FONTA CU GRAFIT VERMICULAR

I. RIPOȘAN • L. SOFRONI

Dr. ing. **Iulian Ripoşan** * Prof. dr. ing. **Laurentie Sofroni**

FONTA CU GRAFIT VERMICULAR

Editura Tehnică
București — 1984

În lucrare se prezintă caracterizarea și producerea fontelor cu grafit vermicular (compact), materiale noi apărute în ultimele două decenii pentru turnarea pieselor și cuprinde rezultatele obținute de către autori, care au inițiat programul de cercetare a acestei fonte în țară încă din primii ani, datele prezente în literatura de specialitate precum și cele elaborate de către comisia de specialitate nou creată, în anul 1977 (7.6 — Fonta cu grafit compact), în cadrul Congresului Internațional de Turnătorie (CIATF).

Lucrarea este *adresată cadrelor tehnice* care lucrează în domeniul elaborării și turnării fontei, *cercetătorilor* care se preocupă de problemele privind cunoașterea și îmbunătățirea calității fontei, *studenților* facultăților cu profil metalurgic și mecanic, precum și *inginerilor proiectanți* de mașini și utilaje, cărora le recomandă un nou material, ce reunește caracteristicile pozitive ale fontelor cu grafit lamelar și nodular. Acest nou material face posibilă reducerea greutății pieselor turnate, mărirea durabilității în exploatare a acestora, o reducere a costului de producție, energie și metal.

Fiind prima lucrare de amploare mai mare care își propune să stabilească identitatea acestui nou material de turnare, sub diferite aspecte, cum ar fi particularitățile structurale, căile de obținere, proprietățile și domeniile de utilizare, autorii sînt conștienți de faptul că este susceptibilă de îmbunătățiri și de o continuă completare și își exprimă speranța că va contribui la extinderea preocupărilor în acest domeniu.

VERMICULAR GRAPHITE CAST IRON

Summary

Reminding the principal stages of the appearance and development of the vermicular graphite cast irons since the signalling of the so-called degenerate graphite shapes till nowadays level of knowledge, this work aim is to make up a synthesis of the main aspects regarding the production, characterisation and use of the youngest member of the foundry irons family.

The first chapter analyses the structural features of the vermicular graphite cast irons, following, the means to characterise the vermicular graphite according to its aspect and dimensions, using for it some stereologie elements.

We present here the structural features and those of the growth mechanism as well as the flake graphite (A and D), vermicular graphite, coral-like graphite, chunky graphite and nodular graphite characteristics, for varions compactnesses. It is analysed the primary structure of the vermicular graphite cast irons, making direct references to the eutectic cells and the eutectoid transformation particularities. There are highlighted the influence of the section thickness and the stability of the modifying effect. There are shown the results obtained for caracterizing the cast irons structure, in liquide state, as well as the hypotheses concerning the forming of the vermicular graphite. In this order it is noticeable the value of the surface tension at the limit between the liquid cast iron and the heads of the graphite prism (0001 and 10 10), the contribution of the cast iron undercooling, the efect of the modifying elements on the remanent graphite in the technical cast irons, the intervention of the antimodifying elements.

The second chapter treats about the cast irons modification, in order to obtain the intermediary graphite shapes. This chapter contains the following sections: 1-Obtaining of the corallike graphite in low-sulphur cast irons, moulded in graphite moulds or in moulding sand moulds (Zr-addition); 2-Use of magnesium, pure or in several combinations (Mg; Mg-Ti; Mg-Ti Al; Mg-Ti Sb; Mg-Zr); 3 — Cerium modification (rare earths — RE) introduced into the liquid iron in various forms and combinations (Ferrocerium; mischmetal; FeSiCe (RE); Ce-Mg; CeMg-Al; CeMg-TiAl); 4 — Use of yttrium (metallic yttrium; yttrium rare earths). There are shown the main chemical interactions that all the used modifying elements are producing in the liquid iron. There are also described the main antimodifying elements we can find in the cast iron (Pb, Si, Sb, Ti, Al, As, Te), underlining their specific action.

The variants taken into consideration present the features of the mentioned technologies: chemical composition of the cast iron, melting set, charge, thermal regim, modifying agents, modifying technique, properties of the cast irons.

Scanned with OKEN Scanner

Special attention is paid to check the modifying effect, using for it: the ultrasonic testing, cooling curves-tracing, magnetic methods, determining of the electrical properties of cast iron, measurement of the shrinkage volume, drawing of the linear contraction curves.

Some problems of the elaboration of the vermicular graphite cast irons make up the subject of the third chapter of this work. There are established the variation domains of the chemical composition and its influence upon the cast iron properties, recommending some limits according to the applied manufacturing technology. There are analysed the used materials and the work conditions of the melting sets (cupola and electric furnaces). A part of this chapter presents the main desulphurization technologies of the cast iron apart from the elaboration units, allowing to obtain the vermicular graphite cast irons even for the some initial cast irons having a high sulphur content.

Some other problems tackled in this chapter are represented by the aluminium alloy vermicular graphite cast irons as well as the possibility to make bigger the perlite ratio in their structure by Ni, Cu, Mn, Sn, Sb, V, As alloying.

The 4-th chapter analyses the vermicular graphite cast irons properties, using a comparative presentation with those of the flake graphite and nodular graphite cast irons. It is for establishing a right place of the vermicular graphite cast iron in the great family of the foundry irons. As for the mechanical properties we treat about the resistance and plasticity, hardness, modulus of elasticity, ductility, fatigue limit, cyclic ductility for normal temperatures as well as for high values. Regarding the physical properties, their characteristics are analysed from the point of view of the density, thermal conductivity and diffusivity, thermal expansion, magnetic and electric properties. We continue by describing the technological and operating properties on which it depends in great measure the use of these cast-irons: oxidation resistance, thermal fatigue resistance, wear comportment with and without lubrification, tightness, machinability, corrosion resistance, weldability. As for the castability, we are analysing the characteristics of the linear shrinkage and especially of the initial dilatation, the shrinkage formation conditions, the hot tearing tendency, the cast irons fluidity. For each case we show the main parameters, the absolute values of the characteristics as well as the relative values in relation to those established for the flake graphite cast irons and nodular graphite cast irons. It is underlining the fact that the vermicular graphite cast irons are characterized by a high ductility, a low notch sensitivity, of the thermal conductivity, good magnetic and electric properties. These cast irons have also a good behaviour to oxidation and thermal shock, machinability and weldability, high compression strength as well as good pouring properties, especially a low shrinkage volume. Generally, the vermicular graphite cast irons gather together the positive features of the ofter kinds of cast irons.

The vermicular graphite cast irons fields of use set up the subject of the 5-th chapter of our work. There are shown the results obtained by using these cast irons for the pouring of gravity dies, highlighting that in many countries important reductions of the gravity dies in relation to the ton of cast steel are

Scanned with OKEN Scanner

obtained. The heat engines and especially the Diesel engines form another field of use, their cylinder heads, pistons, piston rings, gas collectors, flywheels, etc. being made from this kind of cast iron. The motor cars and tractors, building railway implements, machine-tools, hydraulic apparatus, metallic moulds, etc., represent some of the possibilities to use the vermicular graphite cast irons. The vermicular graphite cast irons fields of use are exemplified by cast products, results optained in their exploitation, performances as well as some elements of the typical technologies of their production.

The 6-th chapter of this work shows some of the possibilities to improve the qualities of the cast products in vermicular graphite cast iron using a heat treatment. In this order, it is underlined the possibility to eliminate the free cementite from the products with thin walls by graphitizer annealing and to raise the perlite ratio, by normalizing.

The 7-th chapter presents a number of economic considerations regarding the use of vermicular graphite cast irons in casting pieces, with an emphasis on the main domains where they can replace the flake and nodular graphite cast irons.

The book also contains technological instructions for obtaining vermicular graphite cast irons, under conditions of introducing FeSiCaAlTiMg(Ce).

This work gathers together the results obtained by its authors and those found in the special literature, using at the same time the materials of the 7.6-th Commission of the C.I.A.T.F.

The authors express their hope that the present book could be a way to improve the knowledge about vermicular graphite cast irons, to extend the preoccupations concerning the production and use of this new kind of cast iron.

463 references, 80 tables, 230 figures

Contents

The 1-st chapter — **Structural features of the vermicular graphite cast irons** 21

1.1. Characterisation of the vermicular graphite 21
1.1.1. Dimensional characterisation of the graphite 21
1.1.2. Structural characterisation of the graphite 27
1.1.3. Graphite characterisation through the mechanical properties of the cast iron 34
1.2. Primary and secondary structure 35
1.2.1. Primary structure 35
1.2.2. Secondary structure 41
1.3. Appearance mechanism of the vermicular graphite 45
1.3.1. Structure of the cast iron in liquid state 45
1.3.2. Production mechanism of the graphite compact separations 51
1.3.3. Raise mechanism of the graphitizer degree 63
1.3.4. Stability of the modifying effect 66

The 2-nd chapter — **Cast irons modification in order to obtain vermicular graphite** 70

2.1. Possibilities to obtain vermicular graphite 70
2.2. Obtaining of the intermediary graphite shapes in low-sulphur cast irons 71
2.3. Magnesium use in the cast irons modification 74
2.3.1. Magnesium interactions 74
2.3.2. Modification of low-magnesium cast irons 81
2.3.3. Use of magnesium and antimodifying elements . . . 87
2.4. Use of cerium to obtain vermicular graphite cast irons . . . 99
2.4.1. Cerium as modifying element 99
2.4.2. Cerium modification for obtaining vermicular graphite 103
2.4.3. Modification of magnesium and cerium cast irons . . 108
2.4.4. Use of the Ce-Mg-Al modifying elements 112
2.4.5. Use of the CeMg-TiAl combinations 114
2.5. Use of yttrium to obtain vermicular graphite cast irons . . 122
2.5.1. Yttrium interactions 122
2.5.2. Modification of metallic yttrium cast iron 124
2.5.3. Use of yttrium rare earths 124

2.6. Check of the modification degree 129
2.6.1. Ultrasonic testing 129
2.6.2. Use of the cooling curves 135
2.6.3. Use of the magnetic methods 142
2.6.4. Determining of the electric characteristics 144
2.6.5. Measurement of the shrinkage volume 145
2.6.6. Use of the linear contraction curves 146

The 3-rd chapter — **Elaboration of the vermicular graphite cast irons** 147
3.1. Particularities of the chemical composition 147
3.2. Melting sets 151
3.3. Charge 153
3.4. Desulphurization of the cast iron apart from the elaboration units 154
3.4.1. Desulphurization with CaC_2 154
3.4.2. Desulphurization with CaO 160
3.4.3. Desulphurization with Mg 162
3.5. Alloy of vermicular graphite cast irons 162
3.5.1. Aluminium albă vermicular grapfite cast irons . . . 162
3.5.2. Alloy for increasing the perlite quantity 166

The 4-th chapter — **Proprieties of the vermicular graphite cast irons** . . 169
4.1. Mechanical properties 169
4.1.1. Resistance and plasticity 169
4.1.2. Hardness 177
4.1.3. Modulus of elasticity 179
4.1.4. Ductility 181
4.1.5. Fatigue limit 187
4.1.6. Cyclic ductility 192
4.1.7. Properties at high temperatures 194
4.2. Physical properties 199
4.2.1. Density 199
4.2.2. Thermal conductivity 200
4.2.3. Thermal expansion 205
4.2.4. Electric properties 206
4.2.5. Magnetic properties 207
4.3. Technological and operating properties 208
4.3.1. Oxidation resistance 208
4.3.2. Thermal fatigue resistance 217
4.3.3. Wear resistance 228
4.3.4. Tightness 232
4.3.5. Machinability 236
4.3.6. Corrosion resistance 239
4.3.7. Weldability 241
4.4. Castability 243

Scanned with OKEN Scanner

4.4.1. Linear contraction 243
4.4.2. Shrinkage volume 250
4.4.3. Hot tearing tendency 253
4.4.4. Fluidity 256

The 5-th chapter — **Vermicular graphite cast irons fields of use** 261

5.1. Use of vermicular graphite cast irons to the pouring of gravity dies 261
5.2. Heat engine parts 272
5.3. Some other products for the building industry 284
5.4. Hydraulic apparatus 286
5.5. Electromotors 288
5.6. Machine-tools parts 288
5.7. Some other fields of use 288

The 6-th Chapter — **Heat treatment applied to the vermicular graphite cast iron products** 290

6.1. Graphitizer annealing 291
6.2. Normalizing 294

The 7-th Chapter — **Economic considerations regarding the use of vermicular graphite cast irons in casting pieces** 295

The 8-th Chapter — **Technological instructions for obtaining vermicular cast irons** 302

Bibliography 308

Scanned with OKEN Scanner

Cuprins

Introducere 15

1. Particularitățile structurii fontelor cu grafit vermicular 21

1.1. Caracterizarea grafitului vermicular 21

1.1.1. Caracterizarea din punct de vedere dimensional . . . 21

1.1.2. Caracterizarea din punct de vedere structural . . . 27

1.1.3. Caracterizarea prin intermediul proprietăților mecanice ale fontei 34

1.2. Structura primară și secundară 35

1.2.1. Structura primară 35

1.2.2. Structura secundară 41

1.3. Mecanismul formării grafitului vermicular 45

1.3.1. Structura fontei în stare lichidă 45

1.3.2. Mecanismul obținerii separărilor compacte de grafit 51

1.3.3. Mecanismul măririi gradului de grafitizare 63

1.3.4. Stabilitatea efectului modificator 66

2. Modificarea fontelor în vederea obținerii grafitului vermicular . . . 70

2.1. Posibilități de obținere a grafitului vermicular 70

2.2. Obținerea formelor intermediare de grafit în fontele cu conținut scăzut de sulf 71

2.3. Utilizarea magneziului la modificarea fontelor 74

2.3.1. Interacțiuni ale magneziului 74

2.3.2. Modificarea fontelor cu cantități mici de magneziu 81

2.3.3. Utilizarea magneziului și a elementelor antimodificatoare 87

2.4. Utilizarea ceriului la obținerea fontelor cu grafit vermicular 99

2.4.1. Ceriul ca element modificator 99

2.4.2. Modificarea cu ceriu în vederea obținerii grafitului vermicular 103

2.4.3. Modificarea fontelor cu magneziu și ceriu 108

2.4.4. Utilizarea modificatorilor cu Ce,Mg,Al 112

2.4.5. Utilizarea combinațiilor cu CeMg-TiAl 114

2.5. Utilizarea ytriului la obținerea fontelor cu grafit vermicular. 122

2.5.1. Interacțiuni ale ytriului 122

2.5.2. Modificarea fontei cu ytriu metalic 124

2.5.3. Utilizarea pămînturilor rare cu ytriu 124

2.6. Controlul gradului de modificare 129

2.6.1. Controlul cu ultrasunete 129

Scanned with OKEN Scanner

2.6.2. Utilizarea curbelor de răcire 135
2.6.3. Utilizarea metodelor magnetice 142
2.6.4. Determinarea caracteristicilor electrice 144
2.6.5. Măsurarea volumului de retasură 145
2.6.6. Utilizarea curbelor de contracție liniară 146
3. **Elaborarea fontelor cu grafit vermicular** 147
3.1. Particularitățile compoziției chimice 147
3.2. Agregate de elaborare 151
3.3. Încărcătura 153
3.4. Desulfurarea fontei în afara agregatului de elaborare 154
3.4.1. Desulfurarea cu CaC_2 154
3.4.2. Desulfurarea cu CaO 160
3.4.3. Desulfurarea cu Mg 162
3.5. Alierea fontelor cu grafit vermicular 162
3.5.1. Fonte cu grafit vermicular aliate cu aluminiu 162
3.5.2. Alierea în vederea măririi cantității de perlită . . . 166
4. **Proprietățile fontelor cu grafit vermicular** 169
4.1. Proprietăți mecanice 169
4.1.1. Rezistența și plasticitatea 169
4.1.2. Duritatea 177
4.1.3. Modulul de elasticitate 179
4.1.4. Tenacitatea 181
4.1.5. Rezistența la oboseală 187
4.1.6. Tenacitatea ciclică 192
4.1.7. Proprietățile la temperaturi ridicate 194
4.2. Proprietăți fizice 199
4.2.1. Densitatea 199
4.2.2. Conductibilitatea termică 200
4.2.3. Dilatarea termică 205
4.2.4. Proprietăți electrice 206
4.2.5. Proprietăți magnetice 207
4.3. Proprietăți tehnologice și de exploatare 208
4.3.1. Rezistența la oxidare 208
4.3.2. Rezistența la șoc termic 217
4.3.3. Rezistența la uzare 228
4.3.4. Etanșeitatea 232
4.3.5. Prelucrabilitatea 236
4.3.6. Rezistența la coroziune 239
4.3.7. Sudabilitatea 241
4.4. Proprietăți de turnare 243
4.4.1. Contracția liniară 243
4.4.2. Volumul de retasură 250
4.4.3. Tendința de formare a crăpăturilor la cald 253
4.4.4. Fluiditatea 256

Scanned with OKEN Scanner

5. Domeniile de utilizare a fontelor cu grafit vermicular 261
5.1. Utilizarea fontelor cu grafit vermicular la turnarea lingotierelor 261
5.2. Piese pentru motoare termice 272
5.3. Alte piese pentru construcția de mașini 284
5.4. Hidroaparatură 286
5.5. Electromotoare 288
5.6. Piese pentru mașini unelte 288
5.7. Alte domenii de utilizare 288

6. Tratamente termice aplicate pieselor din fontă cu grafit vermicular 290
6.1. Recoacerea de grafitizare 291
6.2. Normalizarea 294

7. Considerații economice privind utilizarea fontelor cu grafit vermicular la turnarea pieselor 295

8. Fișă tehnică pentru elaborarea fontei cu grafit vermicular 302

Bibliografie 308

Scanned with OKEN Scanner

Introducere

Prin grafit vermicular sînt caracterizate, în prezent, formele intermediare de grafit, cuprinse, din punctul de vedere al compactității, între cele lamelare și cele nodulare. În decursul timpului, aceste forme de grafit au căpătat diferite denumiri, iar apariția lor, nedorită, la începuturile producției de fontă cu grafit nodular, constituie în prezent obiectul unor cercetări în continuă extindere.

Încă din anul 1948, la producția de fontă cu grafit nodular, s-a semnalat apariția în structură a unor forme de grafit considerate ca fiind degenerate, cvasilamelare. Aceste separări de grafit au apărut din cauza unor cantități insuficiente de element modificator (Mg sau Ce), ca urmare a unei durate mari de menținere după modificare sau în piesele cu pereți groși [33, 50, 250, 251, 252, 428].

În anul 1955, Estes, J.W. și Schneidewind, R. anunță posibilitatea obținerii unor fonte de înaltă rezistență, ale căror separări de grafit corespund cu termenul actual de grafit vermicular, prin modificarea cu 0,02% Ce (0,0126% $Ce_{remanent}$) sau prin utilizarea unor combinații Mg-PR [253].

Schelleng, R.D., în anul 1966, prezintă posibilitatea obținerii fontelor cu forme intermediare de grafit, într-o producție controlată [356], utilizînd denumirea de grafit vermicular, propusă de C.K. Donoho în anul 1961 [85].

În perioada 1966...1968 în U.R.S.S., Voronova, N.A. și colaboratorii ei semnalează posibilitatea obținerii lingotierelor din fontă cu grafit vermicular prin modificarea cu ceriu [416].

În anul 1966 a început producția de fontă cu grafit vermicular și în R.P. Chineză, pînă în anul 1981 fiind obținute peste 100 000t piese din asemenea fontă.

În anul 1968, firma Steyr-Daimler-Puch AG, din Austria, produce din fontă cu grafit vermicular feritică, obținută prin modificarea cu mischmetall [401] piese pentru tractoare [353].

După anul 1968, preocupările în direcția obținerii fontelor cu forme intermediare de grafit se intensifică, în această perioadă denumirile acordate acestor forme de grafit multiplicîndu-se, o

Scanned with OKEN Scanner

parte din acestea fiind reconsiderate cîțiva ani mai tîrziu. Astfel, G.N.J. Gilbert și M.G. Day, în anul 1969 utilizează denumirea de grafit vermicular și pentru grafitul lamelar fin, similar cu grafitul tip D obținut în fontele cu conținut foarte scăzut de sulf (sub 0,002%) (patent Austria nr. 263.833) sau în fontele pure din sistemul Fe-C-Si, topite în vid [253].

Beno de Lux și colaboratorii săi, analizînd configurația spațială a acestor forme de grafit, la măriri mari (4000 : 1), introduc denumirea de *grafit coral*. E. Campomanes și R. Goller obțin aceleași forme de grafit fără o viteză de răcire ridicată (forme de grafit), prin adaos de zirconiu, turnarea avînd loc în forme din amestec de formare, utilizînd în acest caz tot denumirea de grafit coral [52].

Termenul de „grafit vermicular", propus de C.K. Donoho în anul 1961 a fost preluat de către American Foundrymen's Society în 1962 în lucrarea „Microstructures of Ductile Iron". Noua ediție „Iron Castings Handbook" (1981) cuprinde și referiri la fonta cu grafit vermicular [253].

Denumirea de *grafit vermicular* a fost adoptată în special în Europa, în Austria, R.F.G., R.D.G., Franța, Olanda, Italia, Norvegia, România, Elveția, Cehoslovacia, Ungaria, U.R.S.S. [253]. În anul 1974, BCIRA (Anglia) introduce denumirea de *grafit compact* termen preluat apoi și în S.U.A.

Un rol important în direcția definirii, producerii și extinderii domeniilor de utilizare a fontelor cu grafit vermicular l-a avut înființarea, în anul 1977, la cel de al 44-lea Congres internațional de turnătorie de la Florența (Italia) a comisiei 7.6 a C.I.A.T.F., „Fonte cu grafit compact". Această comisie a avut, în perioada 1977—1982, opt reuniuni tehnice la care au participat reprezentanți din 17 țări (Belgia, R.F.G., Franța, Marea Britanie,Israel, Japonia, Olanda, Norvegia, Austria, România, Suedia, U.R.S.S., Cehoslovacia, Ungaria, S.U.A., China.

Din cercetările efectuate de la apariția fontelor cu grafit vermicular, ca un nou material pentru turnarea pieselor, se pot remarca cîteva direcții distincte de acțiune în vederea obținerii lor.

În Austria, R.F.G., R.D.G., Ungaria, Cehoslovacia, Norvegia, Franța, Elveția producerea fontelor cu grafit vermicular se bazează pe utilizarea pămînturilor rare (PR), pe bază de ceriu, sub formă de mischmetall (MM), feroceriu (FeCe) sau modificatori complecși FeSiPR.

În U.R.S.S. au fost stabilite tehnologii de obținere pe baza pămînturilor rare, cu adaos de Ytriu (Fe-Si-Y-MM), cei mai utilizați modificatori fiind cei cunoscuți sub denumirea „Siitmiș".

Scanned with OKEN Scanner

În Anglia, producerea fontei cu grafit vermicular a început cu folosirea modificatorilor FeSiMgTi (BCIRA)*. În ultimii ani, rare. Acești modificatori au fost preluați în S.U.A. (Foote Mineral la acești modificatori au mai fost adăugate și cantități de pământuri Company) și dezvoltați la sistemul FeSiCaTiMgAlCe), cunoscuți fiind sub denumirea „Foote C.G."

În R.P. Chineză producția de fontă cu grafit vermicular are la bază atît utilizarea pămînturilor rare (FeSiCaPR), cît și combinațiile magneziului cu elementele antimodificatoare și ceriu (FeSiMgTiPR, FeSiMgAlZnPR).

Japonia produce astfel de fonte cu ajutorul magneziului, a combinațiilor magneziu-elemente antimodificatoare, cu sau fără adaos de ceriu sau numai cu pămînturi rare (FeSiMg, FeSiMgTiSb, Ce-MM, FeSiMgPR).

În R.S. România, pentru producerea fontelor cu grafit vermicular (Fgv) se utilizează combinații ale magneziului cu elementele antimodificatoare, cu sau fără adaos de ceriu (FeSiCaMgTi, FeSiCaMgTiAl, FeSiCaMgTiAlCe), cu posibilitatea reglării gradului de compactitate a grafitului prin postmodificare. Există de asemenea preocupări în direcția stabilirii altor tehnologii de obținere a Fgv. Modificatorii amintiți sînt produși de către ICSITPSC-București, I.M. Vaslui și C.M. Tulcea.

Într-o serie de alte țări, cum ar fi Italia, Suedia, India, Australia, Brazilia se dezvoltă tehnologii atît pe baza magneziului, cît și a ceriului.

Problema terminologiei utilizate în caracterizarea acestei fonte a suscitat numeroase discuții, în special în ceea ce privește folosirea termenului de grafit vermicular sau compact.

Astfel, la ședința Comisiei 7.6. CIATF din 14 iunie 1979 de la Dusseldorf (R.F.G.) au fost propuse denumirile: vermicular, compact, lamelar compact, semi-ductil, unic, vermicular (compact), compact (vermicular). A fost adoptată o denumire de compromis, „fonte cu grafit compact/vermicular", utilizată din anul 1980 de către Comisia 7.6. CIATF, precum și în o serie de țări care produc piese din această fontă.

Autorii utilizează în prezenta lucrare în principal denumirea de grafit „vermicular", cu o mai lungă răspîndire în R.S. România, păstrînd însă și termenul adoptat „compact/vermicular".

O altă problemă, care a stat în atenția comisiei internaționale 7.6 CIATF a constituit-o caracterizarea acestei fonte din punctul de vedere al proprietăților mecanice, fizice, tehnologice, de exploatare și de turnare, promovîndu-se introducerea unor norme

* British cast iron research association

Scanned with OKEN Scanner

(standarde) cu caracter național sau internațional. În perioada 1980—1981, comisia a adoptat trei mărci de fontă de grafit vermicular, funcție de masa metalică de bază și anume: feritică, ferito-perlitică și perlitică, cu proprietățile prezentate în tabelul 1.

Tabelul

TIPURI DE FONTE CU GRAFIT VERMICULAR PROPUSE DE COMISIA 7.6 CIATF [206]

Proprietăți	Tipul fontei cu grafit vermicular		
	Feritică	Ferito-perlitică	Perlitică
Rezistența la tracțiune R_m, în N/mm², minimum	280	315	385
Limita de curgere $R_{0,2}$, în N/mm², minimum	200	210	280
Duritatea *HB*, minimum	120	140	180
Alungirea, în %, minimum	3	1	1
Masa metalică de bază	Maximum 20% P	F + P	Minimum 85% P
Grafit vermicular, în %, minimum	80	80	80

Fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate, în general de minimum 80% Gv, maximum 20% Gn, maximum 3% Gl. În S.U.A., în ianuarie 1982 a fost elaborat un proiect de standard (Standard specification for Compacted Graphite Iron Casting) [460] care stabilește condițiile de recepție și control al pieselor din fontă cu grafit vermicular. Se propun tot trei tipuri de fonte: feritică ($R_m = 262$ N/mm², $R_{0,2} = 193$ N/mm², $A = 3\%$) ferito-perilitică ($R_m = 310$ N/mm², $R_{0,2} = 241$ N/mm², $A = 1{,}5\%$) și perlitică ($R_m = 414$ N/mm², $R_{0,2} = 345$ N/mm², $A = 0{,}75\%$). În general se consideră că la depășirea valorii de 400 N/mm² pentru rezistența la tracțiune, alungirea se micșorează la valori scăzute (<2%).

Producția fontelor cu grafit vermicular a căpătat o extindere deosebită în ultimii ani, atît din punctul de vedere al domeniilor de utilizare, cît și al tonajului. Cele mai importante domenii de utilizare a fontelor cu grafit vermicular sînt următoarele: piese pentru motoare termice, în special Diesel (Austria, U.R.S.S., R.F.G., Japonia, Cehoslovacia, S.U.A., Olanda, Anglia), lingotiere (U.R.S.S., Suedia, Anglia, R.F.G., România, S.U.A.), alte piese pentru construcția de mașini (automobile, tractoare, utilaj feroviar de transport, mașini-unelte).

* * *

Într-o lucrare publicată la noi în țară în anul 1957 [428], sînt semnalate caracteristicile mecanice ridicate și particularitățile structurale ale fontelor ce conțin forme intermediare de grafit, între cel lamelar și nodular. Ca și la ceilalți cercetători din perioada respectivă, aceste forme de grafit erau considerate ca fiind nedorite în fonta modificată. Caracterizarea fontelor modificate cu magneziu la începuturile producerii acestora, ce face obiectul lucrării amintite mai înainte, este remarcată și recunoscută de către literatura de specialitate [252].

Cercetări sistematice în direcția obținerii și caracterizării fontelor cu grafit vermicular au început în cadrul catedrei de turnătorie-forjă a Institutului Politehnic București în anul 1970, și la ICSITPSC-*București în anul 1975. Lucrările publicate de către cele două colective de cercetare au condus la cooptarea României în cadrul Comisiei de specialitate a CIATF (7.6). Aceste preocupări au condus la stabilirea unor tehnologii de obținere a fontelor cu grafit vermicular, la elucidarea unor probleme legate de particularitățile structurale, durabilitatea efectului modificator, stabilirea unor proprietăți tehnologice și de exploatare, unele particularități ale mecanismului de obținere a grafitului vermicular, la identificarea unor domenii de utilizare.

Cercetările efectuate pînă în prezent pe plan mondial au contribuit la îmbogățirea familiei fontelor de turnătorie cu un nou tip de fontă și anume cu fonta cu grafit vermicular [431, 445].

Reunind caracteristicile pozitive ale fontelor cu grafit lamelar (proprietăți bune de turnare, conductibilitate termică ridicată, sensibilitate scăzută la efectul de crestare etc.) și nodular (tenacitate ridicată, tendință scăzută de oxidare, rezistență mărită la șoc termic, o bună compactitate etc.) este posibilă reducerea greutății pieselor turnate, mărirea durabilității în exploatare a acetora, respectiv o reducere a costului în raport cu fontele cu grafit nodular și al celor maleabile.

---

* Institutul de cercetări științifice, inginerie tehnologică, proiectări pentru seetoare calde.

Scanned with OKEN Scanner

1. PARTICULARITĂȚILE STRUCTURII FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR

1.1. Caracterizarea grafitului vermicular

1.1.1. Caracterizarea din punct de vedere dimensional

O metodă relativ simplă de caracterizare a grafitului vermicular o constituie utilizarea unor rapoarte dimensionale, cum ar fi cel între lungimea și grosimea separărilor de grafit (L/g). Propunînd o astfel de modalitate de caracterizare, autorii au definit grafitul vermicular ca avînd raportul între lungime și grosime cuprins în general în limitele 1,5...10 [306, 307, 368]. La acest interval, separările de grafit vermicular au o compactitate mai redusă decît cea a grafitului nodular ($L/g = 1{,}0...1{,}5$), dar net superioară celei înregistrate în cazul grafitului lamelar ($L/g > 30$). Această modalitate de caracterizare a grafitului poate constitui un prim pas în aprecierea compactității grafitului vermicular, ușor de realizat printr-o analiză metalografică obișnuită. În acest mod, autorii au propus trei tipuri caracteristice de grafit vermicular, prezentate în fig. 1.1, notate *I*, *II* și *III* [306, 307, 312, 319].

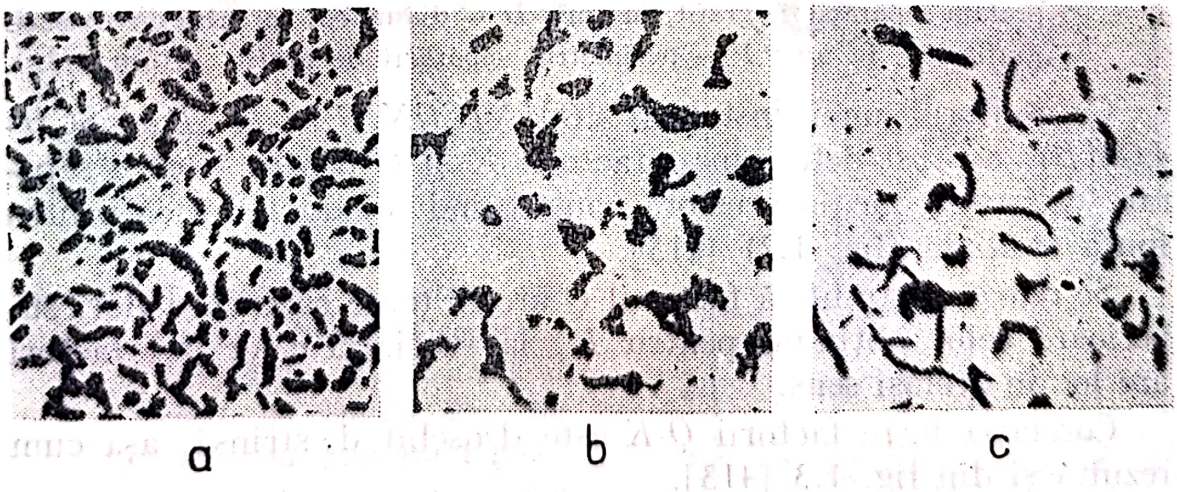


Fig. 1.1. Tipuri caracteristice de grafit vermicular [306, 307]:
a – grafit vermicular tip *I* (×500), cu $L_{max} = 20\mu m$, $g_{max} = 10\mu m$, $L/g = 2...4$; *b* – grafit vermicular tip *II* (×100), cu $L_{max} = 150\mu m$, $g_{max} = 50\mu m$, $L/g = 2...5$; *c* – grafit vermicular tip *III* (×100) cu $L_{max} = 150)\ \mu m$, $g_{max} = 20\ \mu m$, $L/g = (3...10)$

Scanned with OKEN Scanner

Grafitul de *tip I*, apropiat ca dimensiuni de cel de tip D-ASTM este cunoscut în prezent sub denumirea de „coral-graphit" (obținut în fontele cu conținut mic de sulf sau modificate cu zirconiu) și „chunky-graphit" (prezent în zona axei termice al pieselor din fontă cu grafit nodular).

Grafitul vermicular de *tip II*, corespunzător formei M-ASTM, este caracterizat de o compactitate ridicată, în imediata apropiere a grafitului nodular (formele K, L-ASTM).

Cea de a treia formă caracteristică de grafit vermicular (*tip III*) este aceea care corespunde formei P-ASTM, deci în zona cea mai apropiată de grafitul lamelar.

Este evident faptul că zona dintre grafitul lamelar și cel nodular, din punctul de vedere al compactității, are o extindere deosebit de mare, astfel că este dificil să se stabilească o modalitate mai precisă de caracterizare a grafitului, printr-o analiză metalografică obișnuită.

O metodă mai perfecționată de apreciere a compactității grafitului o constituie compararea suprafeței ocupată de către aceasta cu cea corespunzătoare unei compactități maxime, respectiv a grafitului nodular.

În această categorie intră factorii de formă a grafitului stabiliți în lucrarea [413]:

$$K = A/\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2, \tag{1.1}$$

$$Q = 4\pi A/P^2, \tag{1.2}$$

în care: K și Q sînt factori de formă a grafitului (valori subunitare); A — suprafața separării de grafit, în μm^2; D — diametrul cercului circumscris grafitului, în μm; P — perimetrul separării de grafit, în μm.

Cu ajutorul unei instalații „*OMNICON FAS-II (BAUSCH-LOMB)*" au fost determinați factorii K și Q pentru fiecare separare de grafit, media acestora constituind o caracteristică pentru fonta studiată (fig. 1.2) [413].

Se remarcă faptul că factorul Q are în toate cazurile valori superioare celor obținute pentru K, iar variația celor doi factori are loc în același sens.

Corelația între factorii Q-K este deosebit de strînsă, așa cum rezultă și din fig. 1.3 [413].

Pentru separările de grafit vermicular, de forma celor prezentate în fig. 1.3, se poate utiliza și raportul caracteristic notat cu R, care se află în strînsă corelație cu factorul K.

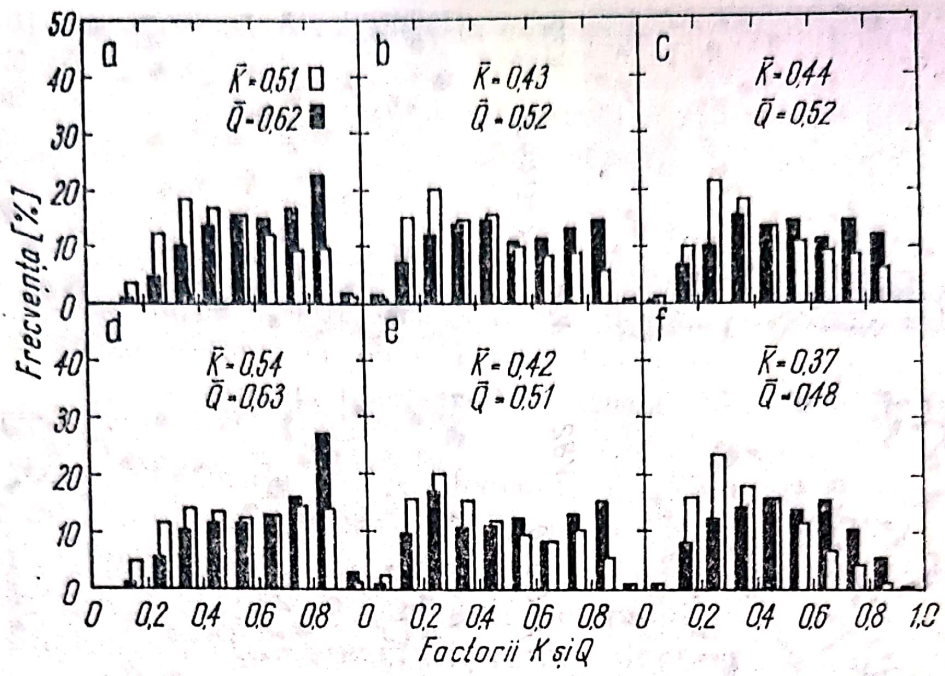


Fig. 1.2. Distribuția valorilor factorilor de formă a grafitului K și Q pentru fontele cu grafit vermicular ($\bar{K}$, $\bar{Q}$ — valorile medii pentru fonta dată) [413].

Experimentările efectuate la ICSITPSC-București au condus la stabilirea scării etalon prezentată în fig. 1.4, pentru caracterizarea grafitului fiind utilizat factorul de formă F_f, ca un raport între suprafața separării de grafit și cea a cercului circumscris acesteia. Pentru fontele tehnice, acest factor de formă variază de la $F_f = 0{,}17$ (100% Gv) pînă la $F_f = 0{,}89$ (100% Gn) [91].

În cazul determinărilor stereometrice, pentru stabilirea factorului de formă a grafitului $\varnothing$ se utilizează relația [364]

$$\varnothing = \frac{3{,}545\sqrt{A}}{P} = \frac{4{,}51\sqrt{\bar{N}_0}}{\bar{N}_i}, \qquad (1.3)$$

în care: A și P sînt suprafața, respectiv perimetrul separării de grafit; $\bar{N}_0$ — numărul mediu de ochi de rețea, din interiorul conturului grafitului; $\bar{N}_i$ — numărul mediu de intersecții ale conturului grafitului cu liniile verticale ale rețelei.

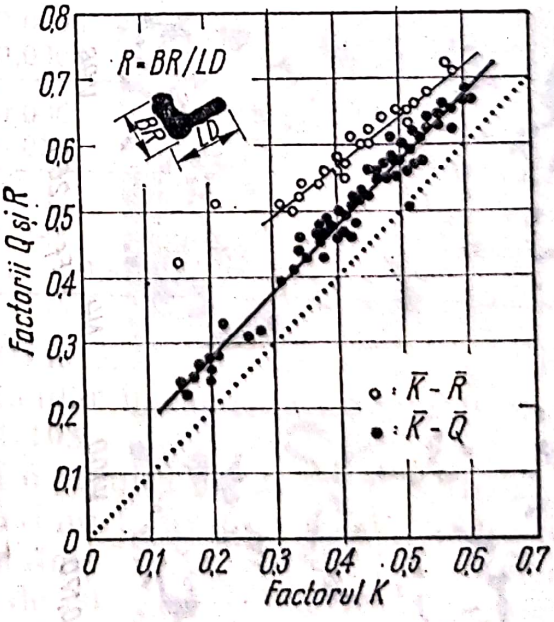


Fig. 1.3 Corelațiile $K-Q$ și $K-R$ la fontele cu grafit vermicular [413].

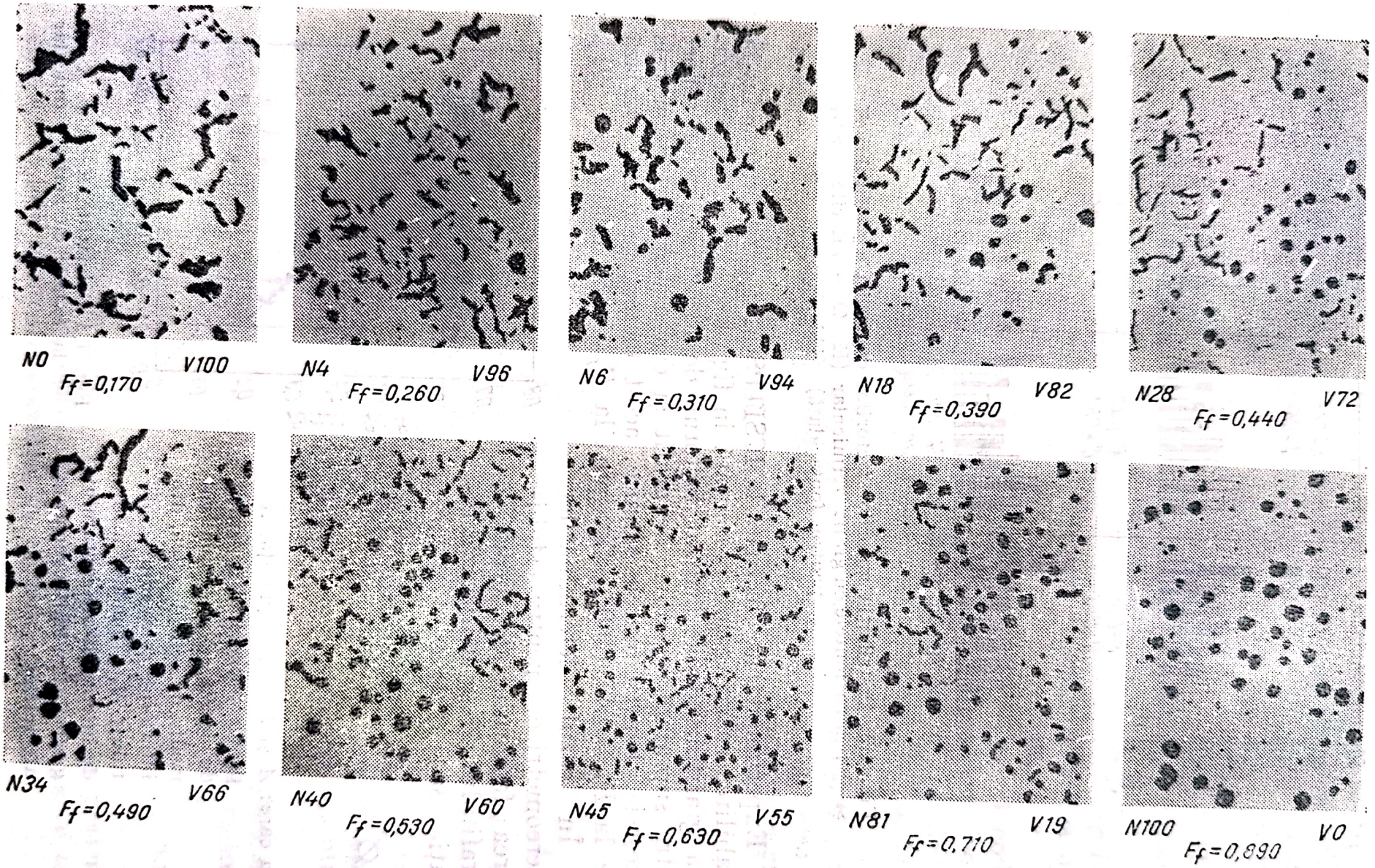


Fig. 1.4. Scară etalon pentru caracterizarea grafitului [91]:
V — grafit vermicular; N — grafit nodular; F_f — factor de formă.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru o separare de grafit, la care se obțin $\overline{N}_i = 126$; $\overline{N}_o = 756$ rezultă $\varnothing = 0{,}98$ [227].

În lucrarea [198] se indică următorii parametri stereologici (S_v, S_{vp}, λ) în vederea caracterizării separărilor de grafit [198]:

$$S_{vp} = S_v/V_v \quad [\mu m^{-1}] \tag{1.4}$$

$$\lambda = 4\,[(1/S_v) - (1/S_{vp})] \quad [\mu m], \tag{1.5}$$

în care: S_v este raportul între aria suprafeței secțiunii separării de grafit și volumul acesteia, în μm^{-1}; V_v — volumul ocupat de grafit în fontă, în %; λ — distanța liberă tridimensională între separările de grafit, în μm.

Analiza structurală a fost efectuată cu ajutorul microscopului asistat de calculator (Quantimet 720).

Pentru formele de grafit cuprinse în clasificarea ISO/R 945—69 (I...VI) au fost obținuți parametrii stereologici din fig. 1.5 [198]. Se constată că separările de grafit vermicular sînt caracterizate prin valorile maxime pentru V_v, S_v și minime pentru λ, în timp ce pentru S_{vp} se obțin valori intermediare.

Parametrii stereologici ai fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular sînt prezentați în tabelul 1.1 [198]. Se apreciază că parametrul S_v dă cele mai bune rezultate în caracterizarea grafitului vermicular, în raport cu celelalte forme de grafit.

Tabelul 1.1

PARAMETRII STEREOLOGICI AI DIFERITELOR FORME DE GRAFIT [198]

Grafit	R_m N/mm²	V_v %	S_v μm^{-1}	S_{vp} μm^{-1}	λ μm
Gn	400...420	7,49...14,6	0,0198... 0,0304	0,109...0,264	116,0...299,4
Gv	340...410	13,2...17,6	0,0365... 0,0583	0,273...0,390	58.4...95,1
Gl	210...280	11,0...18,5	0,0536... 0,147	0,407...1,066	23,4...66,5
Gl	120...470	12,2...22,8	0,192...0,471	1,108...3,05	5,90...18,3

Corelația strînsă între parametrii λ — S_v, prezentată în fig. 1.6 permite încadrarea grafitului vermicular în domeniul $S_v = 0{,}035...0{,}060$ [μm^{-1}] și $\lambda = 55...100$ μm [198].

Din datele prezentate în fig. 1.6 rezultă că distanța între separările de grafit vermicular este mai mică decît în cazul grafitului nodular, ceea ce concordă cu rezultatele obținute de către autorii acestei lucrări, care au găsit valori de 20...100 μm la G_v și 30...150 μm la G_n [308, 319].

Urmărind pierderea efectului modificator în timpul menținerii fontei în stare lichidă, timp de 1...19 min., cercetătorii [408] pre-

Scanned with OKEN Scanner

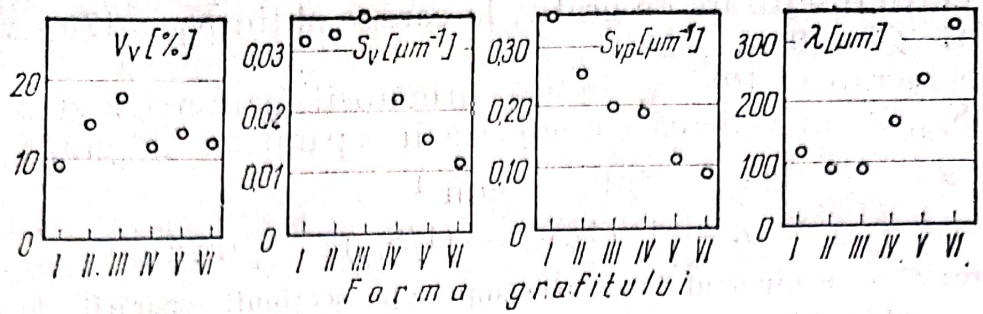


Fig. 1.5. Parametrii stereologici ai grafitului după clasificarea ISO [198]:

I, II — grafit lamelar; *III* — grafit vermicular; *IV*; — grafit în cuiburi; *V, VI* — grafit nodular.

zintă scara etalon din fig. 1.7, pentru caracterizarea compactității grafitului [408].

Analiza structurală a fost efectuată cu ajutorul calculatorului QTM 720, pentru caracterizarea grafitului fiind utilizați factorii de formă F și Er, definiți cu relațiile:

$$F = \frac{4\,A}{\pi\,D^2} \text{ (v. rel. 1.1)}, \tag{1.6}$$

$$E_r = \frac{\sqrt{H_F^2 + V_F^2}}{(1/2)\,P}, \tag{1.7}$$

în care: parametrii H_F, V_F și P sînt definiți în fig. 1.7; P — perimetrul grafitului; H_F, V_F — laturile dreptunghiului, pe a cărui diagonală este amplasat grafitul.

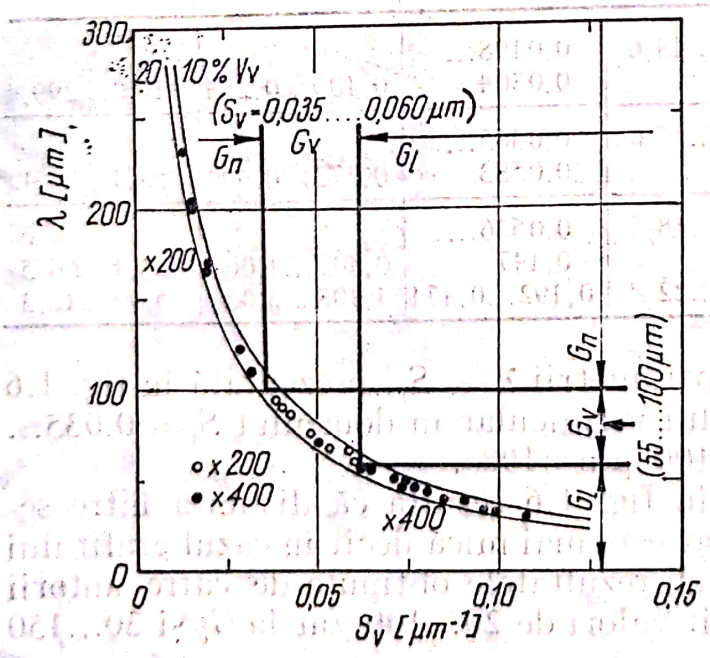


Fig. 1.6. Corelația între parametrii stereologici λ și S_v ai grafitului [198].

Rezultă deci că grafitul vermicular poate fi caracterizat prin valori $E_r = 0{,}6 \ldots 0{,}9$ și $F = 0{,}1 \ldots 0{,}4$. La valori $E_r < 0{,}6$ poate fi încadrat grafitul degenerat iar la $F > 0{,}6$ și $E_r = 0{,}7 \ldots 1{,}0$ grafitul nodular.

Se poate utiliza, de asemenea, scara etalon cu opt forme caracteristice de grafit, de la cel lamelar ($K_f = 1$) pînă la cel nodular ($K_f = 8$) [95]. Grafitul vermicular este caracterizat prin valori ale factorului de formă $K_f = 5$—6.

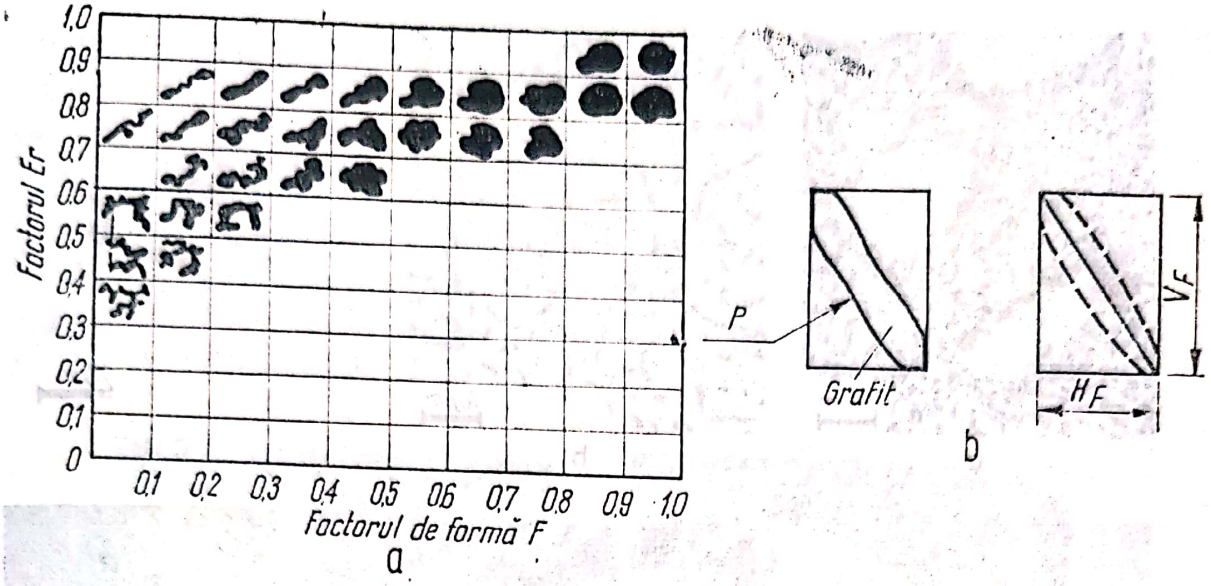


Fig. 1.7. Scara etalon pentru aprecierea compactității grafitului (*a*) și parame trii pentru definirea factorilor de formă (*b*) [408].

Variind gradul de modificare a fontei, în condițiile utilizării elementelor Mg, Ti, Al, autorii acestei lucrări au obținut scara etalon prezentată în fig. 2.15 [313, 368]. Grafitul vermicular este prezent în fontele la care factorul complex $K_2 = (4{,}4\ \text{Ti} + 1{,}6\ \text{Al})/\text{Mg}_{rem} = 10...25$, respectiv pozițiile $(f - g)$ din scara prezentată.

1.1.2. Caracterizarea din punct de vedere structural

Într-o amplă lucrare [225] se studiază morfologia diferitelor forme de grafit, precum și factorii care favorizează trecerea de la o formă de grafit la alta.

Avînd în vedere variația vitezei de răcire (urmărită cu probe tip pană), a compoziției chimice de bază, a cantității și tipului modificatorului (cu PR și Mg) și a duratei de menținere după modificare se sugerează următoarea ordine de succesiune a formelor de grafit:

$$A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow G \text{ coral} \rightarrow Gv \rightarrow Gn \text{ (compactitate redusă)} \rightarrow Gn, \quad (1.8)$$

în care:

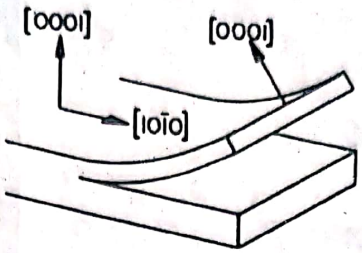
A reprezintă grafitul lamelor propriu-zis; B — grafit lamelar tip rozetă; D — grafit lamelar interdendritic (de subrăcire).

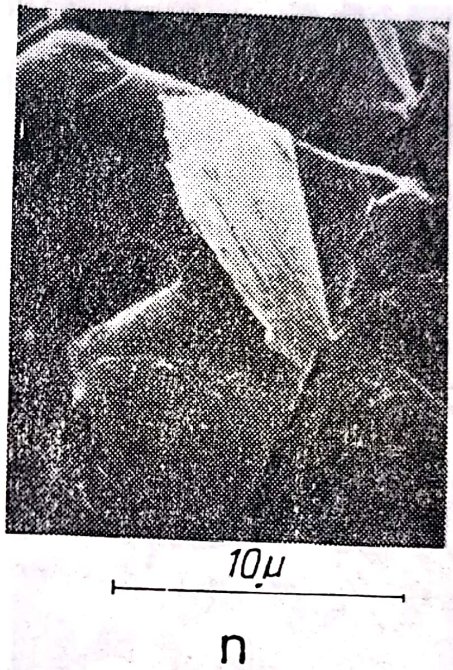
În prezent există preocupări în direcția îmbogățirii scării etalon privind formele tipice de grafit, în special cu formele *coral* și *vermicular* [299, 451].

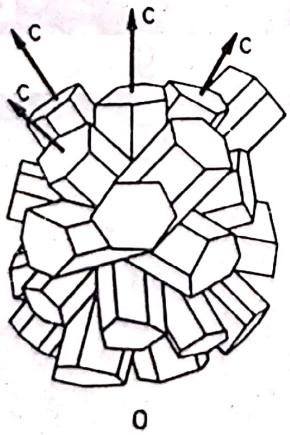
În fig. 1.8 și fig. 1.9 este prezentat aspectul diferitelor forme de grafit.

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner







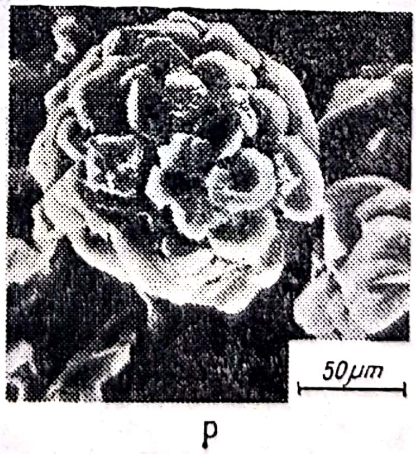


Fig. 1.8 Aspectul diferitelor forme de grafit:

a,b,c,d — grafit coral (microscop optic) [229]; *e,f,g* — grafit coral (scanning microscop) [229]; *h* — grafit coral (scanning microscop) [230]; *i,j* — grafit de subrăcire (D) (microscop optic), [229]; *k,l* — grafit de subrăcire (D) (scanning microscop) [229]; *m,n* — grafit lamelar (mecanismul creștere) [230]; *o,p* — grafit nodular (mecanismul de creștere) [230].

Scanned with OKEN Scanner

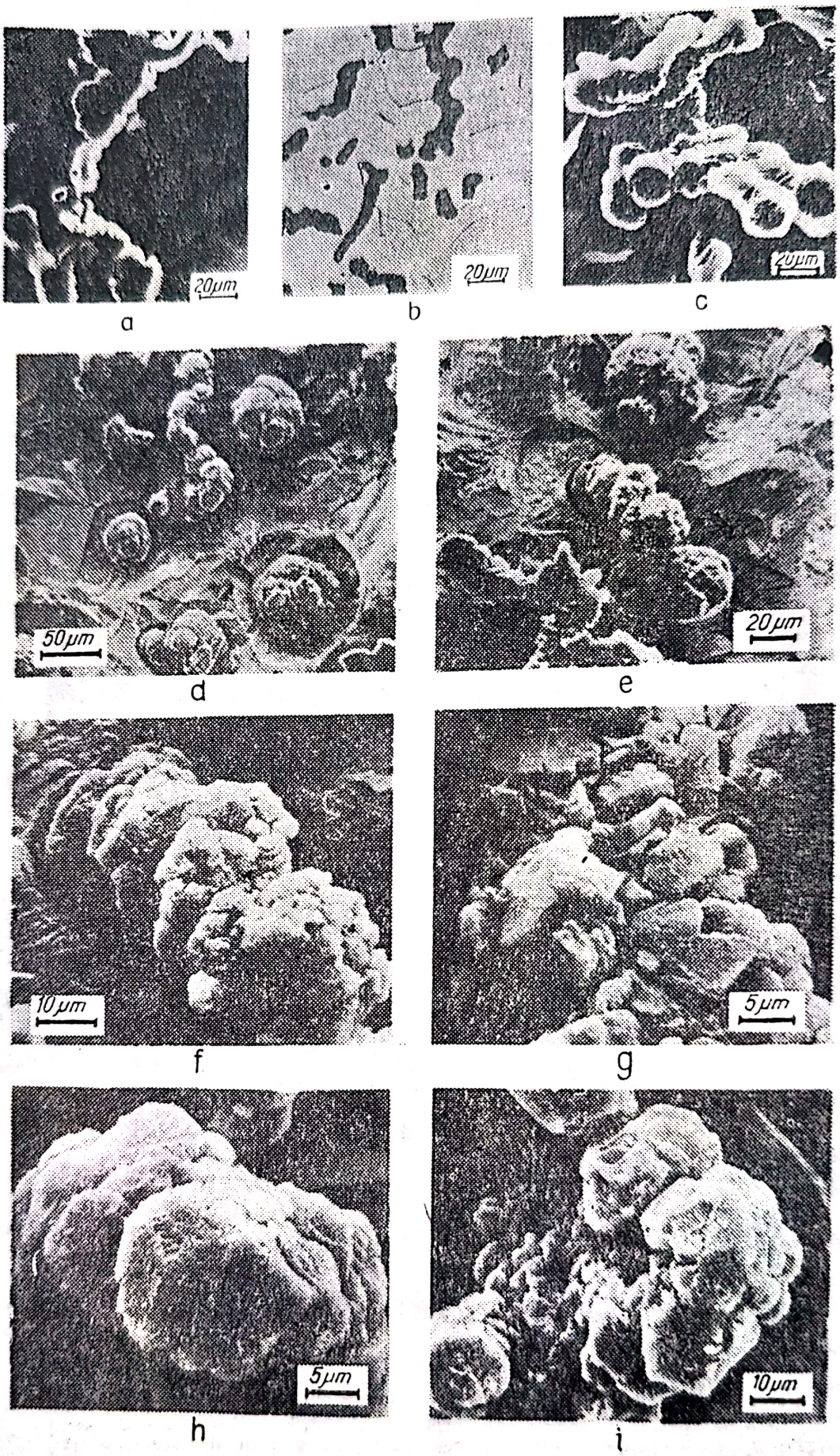


Fig. 1.9. Structura grafitului vermicular:
a,bc—Austrian Foundry Res. Inst. Leoben [253]; *d...i*—Dr. H. Mayer, Sulzer Brothers, Switzerland [229]

Scanned with OKEN Scanner

Separările de grafit lamelar (A) prezintă asperități, mici ramificații, încovoieri în jurul planului bazal, creșterea avînd loc după mecansimul elicoidal.

Grafitul de tip D este mai ramificat decît cel de tip A, dar se prezintă totuși ca separări individuale.

Trecerea de la grafitul A la D are loc la mărirea vitezei de răcire.

Grafitul tip „coral" se prezintă sub forma unor separări cu legături multiple între ele (interconectate). Se consideră că creșterea are loc după același mecanism ca și la grafitul lamelar, dar în condiții în care nu există posibilitatea dezvoltării. La măriri mari (3 000 și 10 000 :1) se constată că grafitul coral are aceeași formă ca și cel vermicular, din care cauză în multe cazuri este cunoscut și sub denumirea de grafit vermicular.

Grafitul vermicular diferă de cel coral, mai fin, cu un ordin de mărime. În interiorul celulelor eutectice grafitul coral se prezintă ca o rețea ramificată și interconectată în mare măsură, asemănător cu cel lamelar. Grafitul vermicular, dimpotrivă, tinde mai mult către cel nodular avînd în vedere că fiecare separare de grafit, împreună cu învelișul austenitic, formează o celulă eutectică de pînă la 10 ori mai mică decît cea de la fontele cu grafit tip coral [253]. La grafitul vermicular creșterea longitudinală este favorizată de contactul mai îndelungat cu fonta lichidă, în timp ce în direcție transversală există deja un înveliș de austenită (v. § 1.2.1). Grafitul crește cu o viteză mai mare decît austenita, capetele acestuia prezentînd forme rotunjite. Învelișul de austenită, cu o rigiditate ridicată, favorizează o creștere asimetrică a grafitului, care capătă un aspect „vermicular" [253].

În lucrarea „Principal Graphite Forms in Cast Iron" editată de BCIRA în anul 1976, grafitul *vermicular* este prezentat ca avînd o structură bine ramificată, interconectată și foarte bine structurată, la o analiză optică obișnuită fiind ușor de confundat cu grafitul de subrăcire. Privit însă tridimensional, separările de grafit au un aspect „vermicular" în loc de lamelar. După sursa citată, *grafitul compact* se formează prin rotirea și îngroșarea grafitului lamelar obișnuit. Aceasta este o tranziție continuă de la grafitul normal (lamelar) spre cel complet compact (nodular). Primele etape ale transformării sînt adesea greu de detectat prin examinările metalografice obișnuite, uneori fiind greșit identificat cu cel vermicular [253].

Grafitul vermicular fin (coral) este o formă de grafit eutectic interconectat care nu a avut posibilitatea de creștere sub formă de placă, avînd același mecanism de creștere ca și cel lamelar. Trecerea spre grafitul vermicular propriu-zis se realizează prin îngroșarea lamelelor, sub acțiunea elementelor modificatoare (Mg. Ce) [79, 80].

Scanned with OKEN Scanner

La o viteză de răcire scăzută are loc o trecere $G_{coral} \rightarrow G_D$, (grafit tip D), în timp ce la mărirea vitezei de răcire grafitul coral devine tot mai compact, pînă ce ajunge la cel vermicular.

La o viteză medie de răcire grafitul coral are o dezvoltare puternic ramificată, ceea ce îl deosebește de cel vermicular.

Grafitul vermicular (Gv) prezintă capete rotunjite și o creștere spiralată, formarea celulelor eutectice fiind asemănătoare cu cea constatată la grafitul nodular. La creșterea vitezei de răcire are loc trecerea Gv→Gn, în timp ce la micșorarea vitezei de răcire este posibilă tranziția Gv→G_{coral}→D→A.

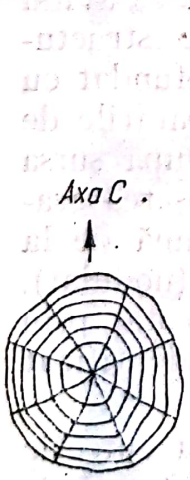
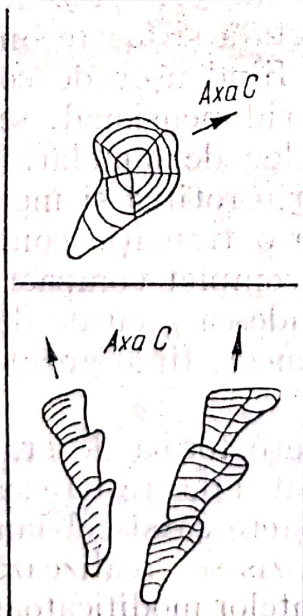
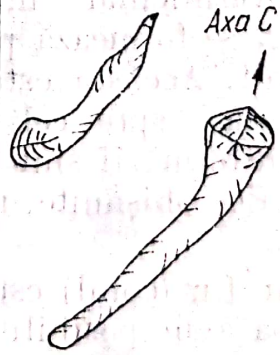
Alături de grafitul nodular (Gn), în structura fontelor pot să apară forme degenerate, caracteristică fiind forma „Chunky-graphit" cu o structură identică cu cea a grafitului nodular.

După alți autori grafitul vermicular și Chunky-graphit cresc după același mecanism [436].

Autorii lucrării [225] consideră că obținerea diferitelor forme de grafit depinde nu de existența unor germeni diferiți, ci de anumite particularități ale mecanismului de creștere. Luînd în considerare vitezele de creștere după axele A și C (v_A și v_C) se prezintă situația din tabelul 1.2 [225].

Tabelul 1.2

RAPORTUL VITEZELOR DE CREȘTERE A GRAFITULUI [225]

$\frac{v_A}{v_C} < 1$			$\frac{v_A}{v_C} > 1$
Grafit nodular	Forme deteriorate de grafit nodular	Grafit vermicular	Grafit lamelar (A și D)
			

Scanned with OKEN Scanner

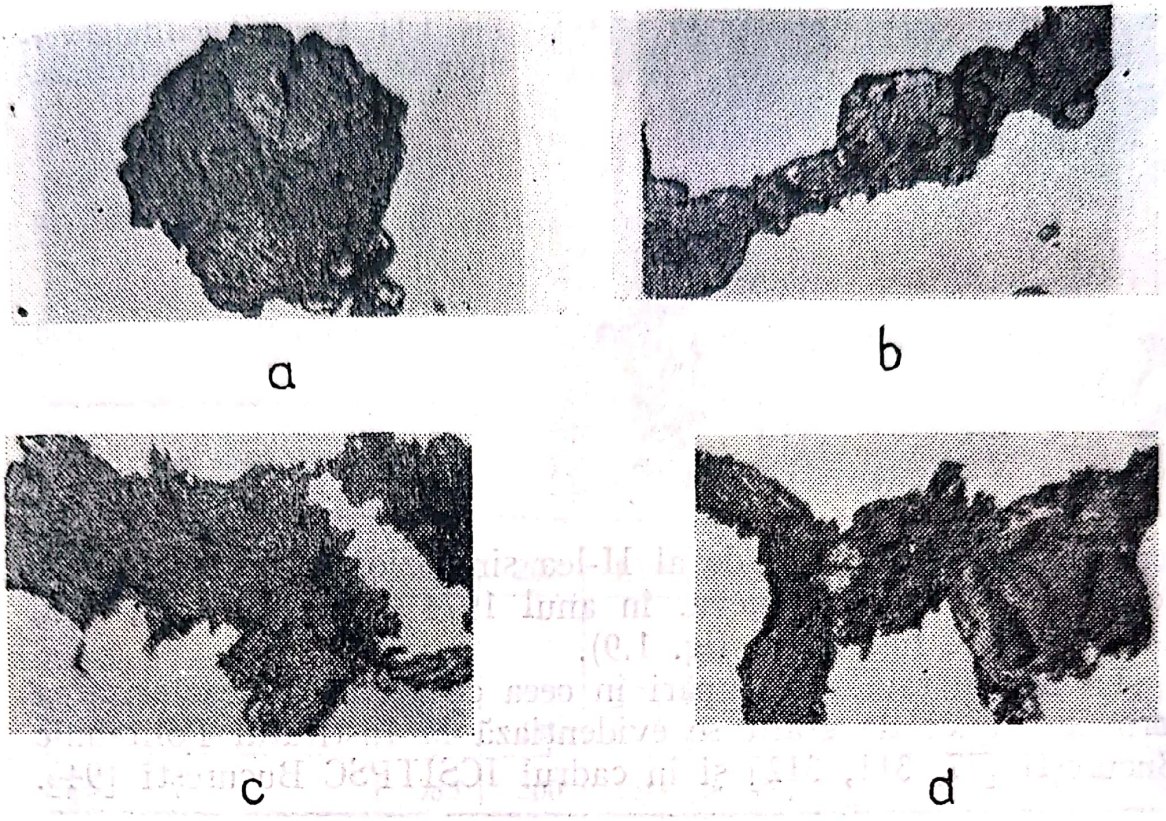


Fig. 1.10. Structura grafitului, după un bombardament ionic, la (× 1000) [1]: *a* — grafit nodular; *b,c,d* — grafit vermicular.

Grafitul lamelar (A și D) crește predominant în lungul axei A ($v_A/v_C > 1$), în timp ce la grafitul nodular are loc raportul $v_C/v_A > 1$.

La grafitul vermicular, ca și la formele degenerate de grafit nodular, predomină creșterea după axa C.

Analiza în urma bombardării ionice scoate în evidență faptul că structura grafitului vermicular este apropiată de cea a grafitului nodular (fig. 1.10) [1].

Grafitul nodular are o structură stratificată, cu o creștere concentrică a planelor rețelei de bază (fig. 1.10, *a*), în timp ce grafitul vermicular apare ca un agregat de cristale, cu orientări diferite ale planelor bazale ale rețelei cristalografice, apropiate cu o dispunere concentrică, dar cu o creștere preferențială în lungul planului bazal (fig. 1.10, *b*, *c*, *d*).

Unele din cristale se prezintă ca și cum ar fi fragmente din nodule de grafit, cu o distribuție concentrică-stratificată a planelor de bază, în timp ce altele au structura unor lamele de grafit, creșterea avînd loc în lungul planelor de bază. Prin lustruiri succesive s-a constatat că separările de grafit vermicular au o structură ramificată, tip coral, concluzie la care se ajunge și în lucrarea [378] (fig. 1.11).

Stabilirea particularităților principalelor forme de grafit și în special ale grafitului D, coral și vermicular, a constituit o temă

Scanned with OKEN Scanner

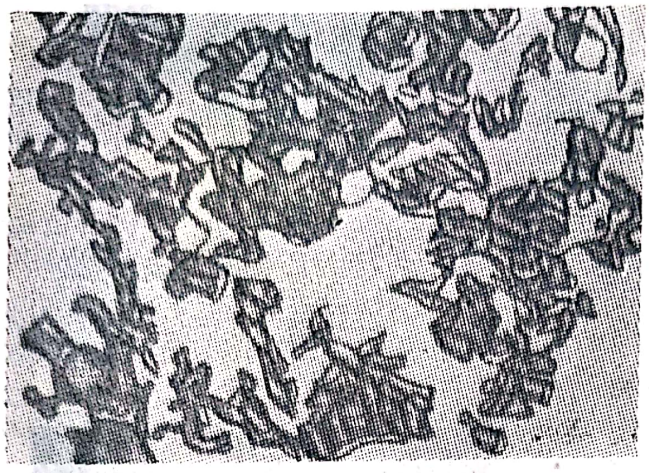


Fig. 1.11. Aspectul grafitului vermicular în urma unor șlefuiri succesive [378].

centrală în cadrul celui de al II-lea simpozion al fontei turnate desfășurat la Batell-Geneva, în anul 1974 [102, 229, 230, 235, 248, 337] (v. fig. 1.8 și fig. 1.9).

La noi în țară, preocupări în ceea ce privește caracterizarea formelor tipice de grafit se evidențiază la Institutul Politehnic București [77, 311, 312] și în cadrul ICSITPSC București [94].

1.1.3. Caracterizarea prin intermediul proprietăților mecanice ale fontei

În [214, 215] se propune o caracterizare a fontelor cu grafit vermicular, folosind un factor de formă a grafitului (K_a) definit prin relația

$$\frac{R_m}{HB} = m = 3{,}5\ (1 - K_a G), \qquad (1.9)$$

în care: R_m și HB sînt rezistența la tracțiune (N/mm²) respectiv duritatea (HB) a fontelor; G — cantitatea de carbon sub formă de grafit, în % (grafit eutectic, la fontele cenușii sau total, la cele cu grafit nodular).

Cantitatea de carbon sub formă de grafit (G) se calculează cu relațiile:

— pentru fonta cu grafit nodular

$$G = \%\,C - 0{,}6 \quad [\%], \qquad (1.10)$$

— pentru fontele cu grafit lamelar și vermicular

$$G = \%\,C + \%\,Si/4 + \%\,P/2 - 2{,}1\ [\%] \qquad (1.11)$$

În relația (1.10) coeficientul 0,6 reprezintă conținutul de carbon din perlita cu siliciu ridicat (ca în cazul Fgn), în timp ce în relația (1.11) coeficientul 2,1 este conținutul maxim de carbon în austenită, la temperatura eutectică.

În tabelul 1.3 sînt prezentate caracteristicile fontelor în corelație cu valorile factorului de formă a grafitului (K_a) [214], iar,

în fig. 1.12 dependența K_a de conținutul de magneziu remanen [215]. Rezultă că fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate prin factori de formă a grafitului $K_a = 0{,}17...0{,}22$. Acest factor este cuprins între 0,3 ... 0,4 în cazul fontelor cu grafit lamelar și între 0,02...0,08 în cazul fontelor cu grafit nodular.

Tabelul 1.3

CARACTERISTICI MEDII ALE FONTELOR CU GRAFIT LAMELAR, VERMICULAR ȘI NODULAR [214]

Tipul fontei	R_m N/mm²	HB	m	K_a	Abaterea standard pentru K_a	Coeficient de variație a K_a, %	CE %
Fgl	250	203	1,25	0,351	0,010	3	3,93
Fgv							
După „Foote Mineral Co"	360	160	2,27	0,171	0,005	2,9	4,15
După „Deere Co"	420	186	2,28	0,191	0,007	3,7	3,92
Fgn	585	200	2,93	0,046	0,007	15,7	4,50

1.2. Structura primară și secundară

1.2.1. Structura primară

Structura primară a fontelor cu grafit vermicular prezintă anumite *particularități* în raport cu celelalte tipuri de fonte. Astfel trecerea de la fontele nemodificate la cele modificate (cu grafit lamelar și vermicular) determină o *creștere a numărului de celule eutectice* (fig. 1.13). Fontele cenușii cu grafit lamelar au conținut

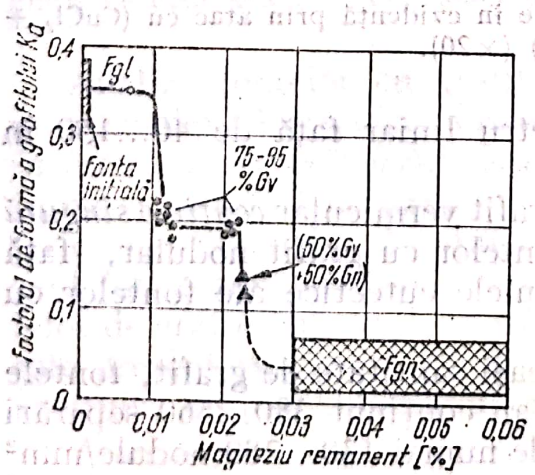


Fig. 1.12. Corelația între factorul de formă a grafitului (K_a) și conținutul de magneziu remanent al fontei [215].

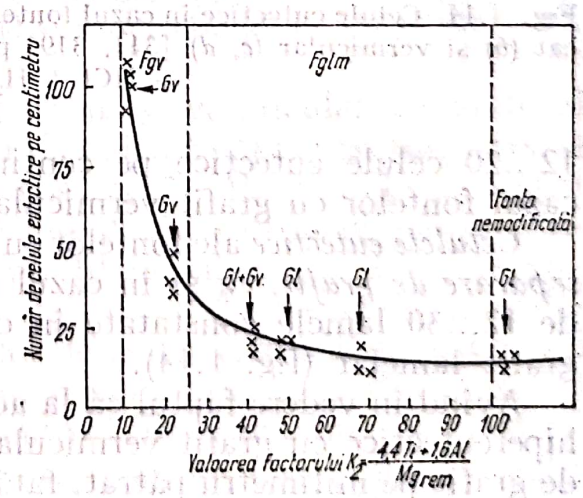


Fig. 1.13. Influența gradului de modificare K_a (v. § 2.3.3) asupra numărului de celule eutectice

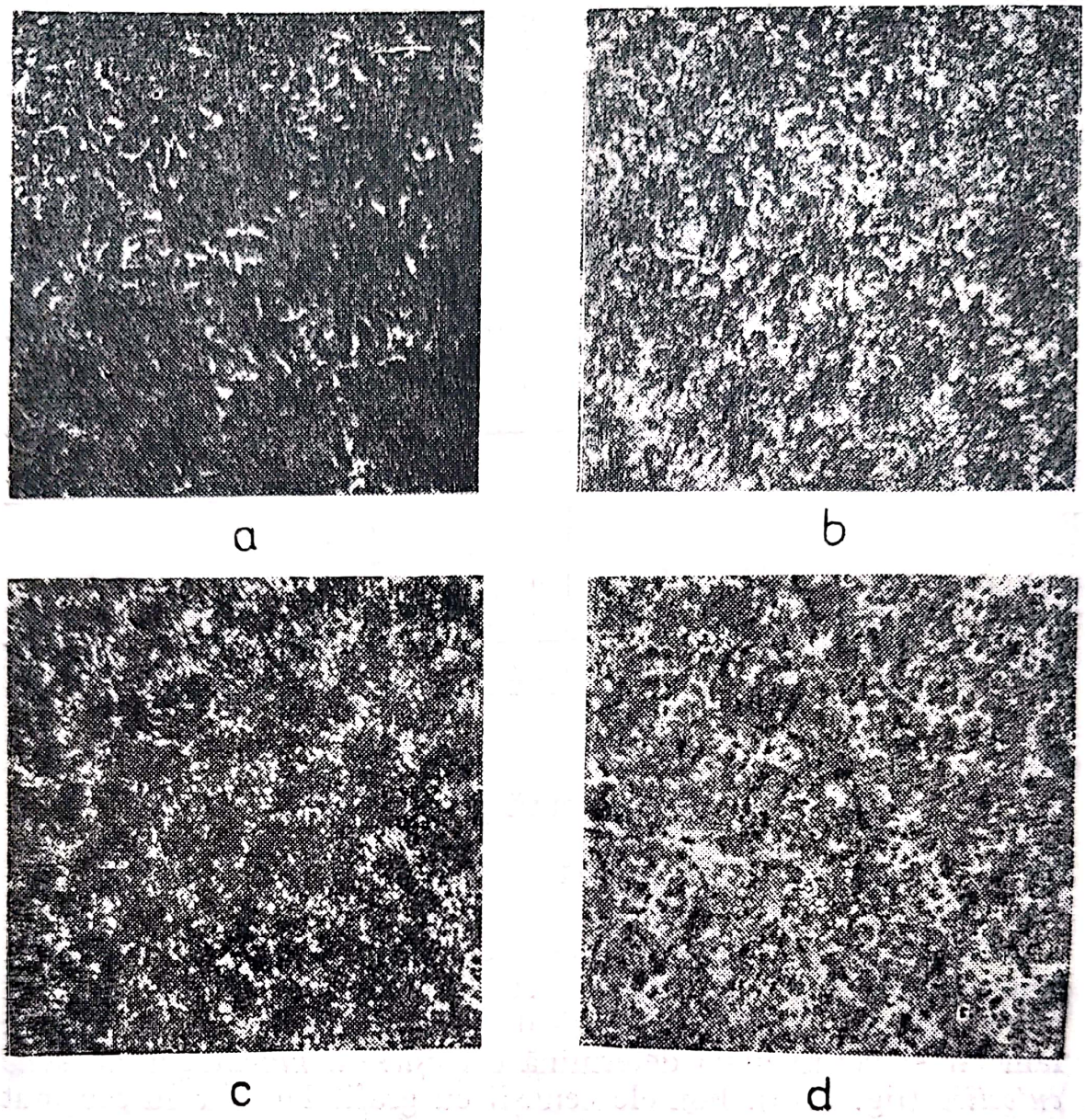


Fig. 1.14. Celule eutectice în cazul fontelor cu grafit lamelar (*a*), lamelar modificat (*b*) și vermicular (*c*, *d*) [311, 319] puse în evidență prin atac cu ($CuCl_2$ + + HCl + H_2O) (×20).

12...20 celule eutectice pe centimetru liniar față de 40...150 în cazul fontelor cu grafit vermicular.

Celulele eutectice ale fontelor cu grafit vermicular *conțin o singură separare de grafit*, ca și în cazul fontelor cu grafit nodular, față de 12...30 lamele constatate în celulele eutectice ale fontelor cu grafit lamelar (fig. 1.14).

Avînd în vedere faptul că la aceeași cantitate de grafit, fontele hipereutectice cu grafit vermicular au conținut 380...560 separări de grafit pe milimetru-pătrat, față de numai 130...280 nodule/mm² constatate, în condiții de solidificare asemănătoare, la fontele cu grafit nodular, se poate aprecia că *numărul de celule eutectice* este *maxim* în cazul fontelor cu grafit vermicular.

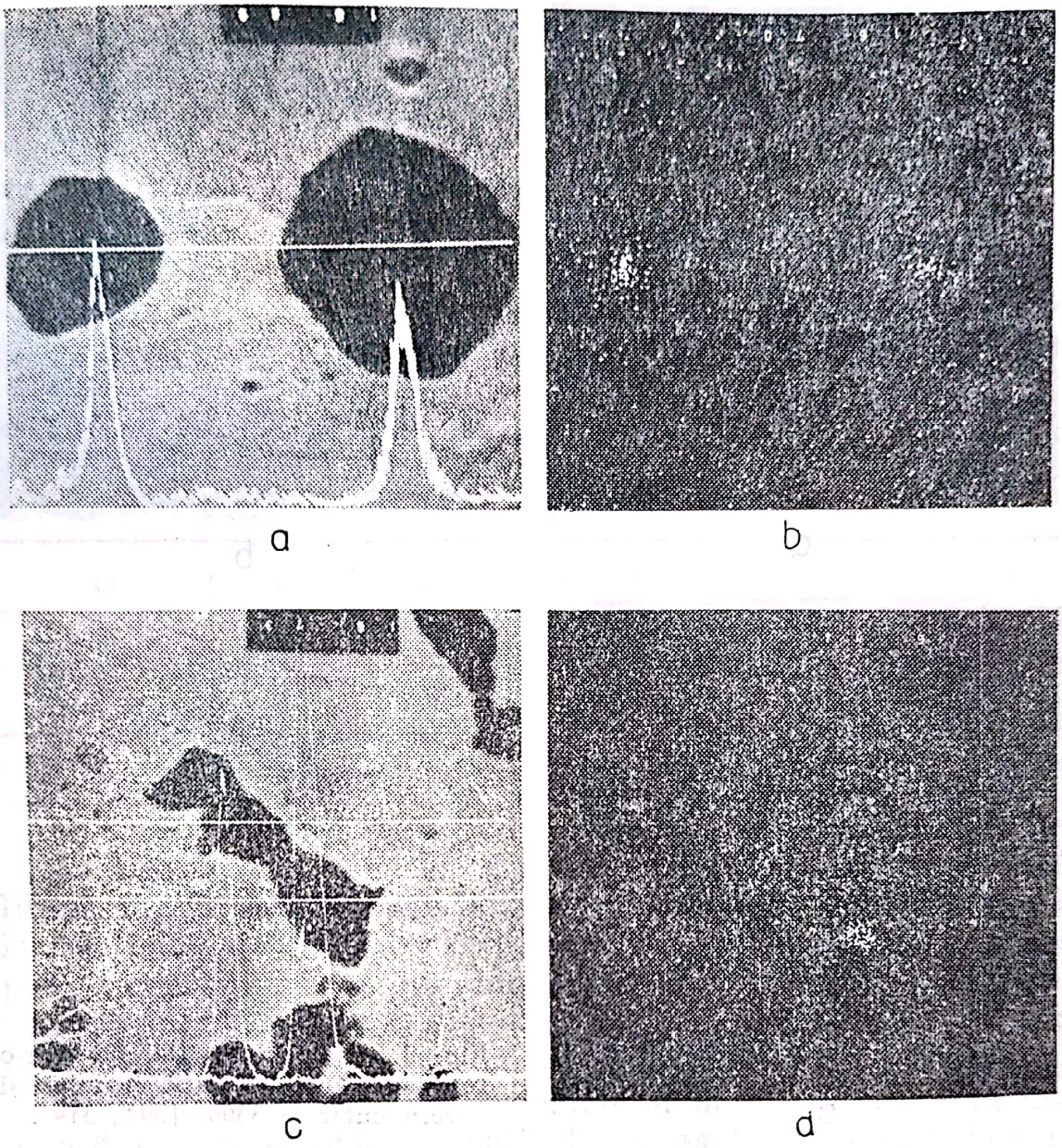


Fig. 1.15. Profilul magneziului în grafitul nodular (*a*) și vermicular (*c*) și imaginea cu raze X a grafitului nodular (*b*) și vermicular (*d*) (× 3360) [308, 319].

Analiza fontelor cu grafit nodular și vermicular cu ajutorul microsondei electronice scoate în evidență *prezența magneziului în interiorul separărilor de grafit* (fig. 1.15). Magneziul este absent în masa metalică de bază (< 10 impulsuri/s) ca și în zonele periferice ale nodulelor de grafit (sub 10 impulsuri/s), dar este prezent într-o zonă centrală, care ocupă 10...15% din volumul nodulelor de grafit. În cazul separărilor de grafit vermicular, magneziul este prezent pe circa 70% din lungimea și 15...25% din grosimea acestuia, deci predominînd în sensul vitezei maxime de creștere.

Distribuția siliciului prezintă de asemenea o serie de particularități (fig. 1.16). Astfel, zona masei metalice, de la contactul cu grafitul nodular este mai bogată în siliciu decît cea aflată la o

Scanned with OKEN Scanner

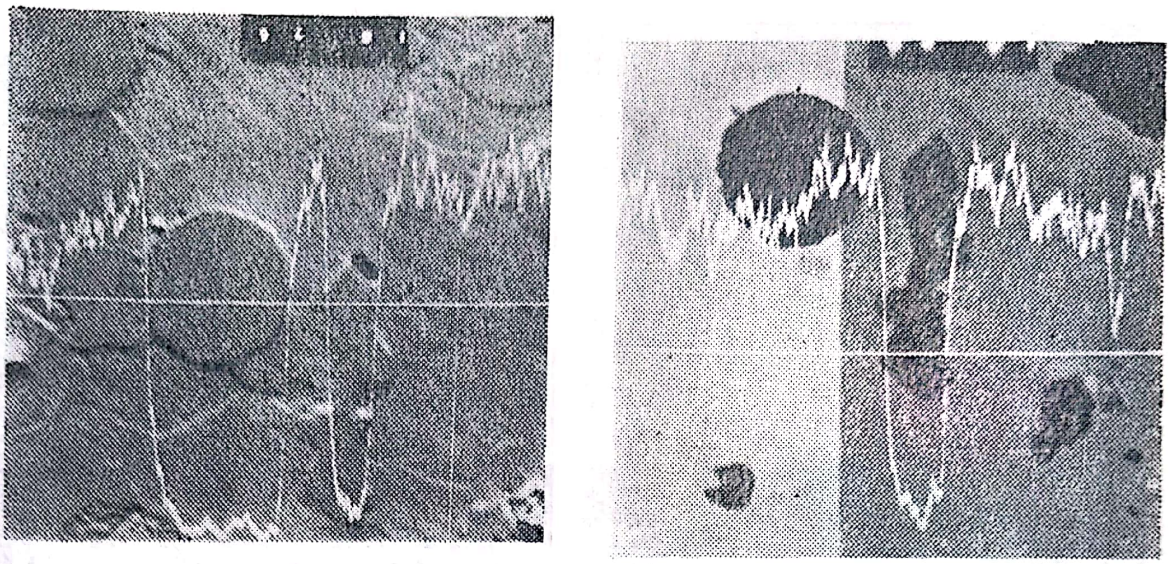


Fig. 1.16. Profilul siliciului într-o zonă ocupată de grafit nodular și vermicular (× 3360) [308, 319].

distanță mai mare de acesta (cu circa 26%). Rezultate similare, respectiv o segregație a siliciului de ordinul 20...40% se constată și în cazul grafitului vermicular, dar numai în sensul vitezei de creștere a acestuia. Zonele masei metalice de la capetele grafitului vermicular prezintă o segregație în siliciu față de zonele mai îndepărtate de 13...19%, deci mai mică decît în cazurile prezentate anterior. Rezultă deci că austenita solidificată la capătul grafitului vermicular conține mai puțin siliciu decît cea din zona laterală a grafitului vermicular sau cea din jurul grafitului nodular [308, 319].

Se poate considera deci o creștere a grafitului nodular printr-un înveliș complet de austenită, în timp ce la grafitul vermicular acest înveliș există doar parțial, în părțile laterale (direcția vitezei minime de creștere), capetele separării de grafit găsindu-se în contact cu lichidul un timp mai îndelungat.

O concluzie similară este prezentată și în cazul lucrărilor [1, 2, 5, 133, 407, 436].

Tendința de albire a fost urmărită în cazul turnării în forme din amestec de formare și de grafit a unor probe cu grosime de perete de 30 și 60 mm, din fonte cu grafit lamelar, vermicular și nodular, cu $S_c = 1{,}07$ (tabelul 1.4) [324].

Tabelul 1.4

MASA METALICĂ, ÎN CENTRUL PROBELOR, LA $S_c = 1{,}07$ [324]

Diametrul probei mm	Conținut de ferită în probele turnate în amestec de formare, %			Conținut de cementită în probele turnate în forme de grafit, %		
	Fgn	Fgv	Fgl	Fgn	Fgv	Fgl
30	60	80	50	30	25	15
60	90	90	65	10	8	5
X_{60}/X_{30}	1,5	1,125	1,3	0,33	0,32	0,33

Notații. X_{60}, X_{30} — Componenta masei metalice în centrul probelor Ø 60 mm, respectiv Ø 30 mm

La turnarea în forme de grafit în structură apare cementită liberă, în cantitate maximă la fontele cu grafit nodular și minimă la cele cu grafit lamelar. Fontele cu grafit vermicular ocupă o poziție intermediară pentru ambele grosimi de perete, ceea ce denotă o tendință de albire mai scăzută decît în cazul fontelor cu grafit nodular.

Rezultate similare sînt prezentate și în tabelul 1.5 prin intermediul mărimii zonei de fontă albă de probele tip pană, la mai multe valori ale carbonului echivalent [270]. În timp ce probele pană turnate din fontă cu grafit lamelar nu prezintă zone de fontă

Tabelul 1.5

TENDINȚA DE ALBIRE A FONTELOR CU DIFERITE FORME DE GRAFIT [270]

Carbon echivalent *CE*, %	Fgl			Fgv			Fgn		
	Probe pană cu baza mare, mm								
	3	6	9	3	6	9	3	6	9
	Înălțimea zonei de fontă albă, mm								
4,3	0	0	0	18	3	0	Maximă	14	3
4,1	0	0	0	21	8	0	22	16	0
3,8	0	0	0	Maximă	15	0	Maximă	Maximă	3

Scanned with OKEN Scanner

albă, aceasta este prezentă în cazul fontelor cu grafit vermicular și nodular. Pentru toate tipurile de probe, respectiv compoziții chimice, tendința de albire este mai scăzută în cazul fontei cu grafit vermicular.

Geometria pieselor turnate influențează în mare măsură caracteristicile grafitului vermicular. În cadrul experimentărilor au fost utilizate probe cu modulul Z (raportul între volum și aria totală a suprafeței exterioare) de 3,5; 6,5 și 10 mm și de diferite geometrii: cilindru, placă, prismă pătrată, prismă echilaterală, prismă hexagonală și prismă triunghiulară [324].

Dacă la un modul de răcire scăzut ($Z = 3{,}5$ mm), raportul între lungimea și grosimea separărilor de grafit (L/g) variază în limite strînse (6...9), odată cu mărirea dimensiunilor probelor ($Z = 6{,}5...10$ mm) crește atît intervalul de cuprindere a valorilor raportului L/g cît și diferența între valorile obținute în centrul și la suprafața probelor.

Dependența caracteristicilor grafitului vermicular de geometria probelor turnate este prezentată în fig. 1.17. În cazul probelor tip placă, caracteristicile dimensionale ale separărilor de grafit sînt practic de același ordin de mărime în centru și la suprafață, în timp ce deosebiri mari apar la probele cilindrice, prismatice hexagonale și pătratice.

Modificarea în formă a fontelor micșorează în mare măsură deosebirile între părțile centrale și marginile ale probelor, atît în

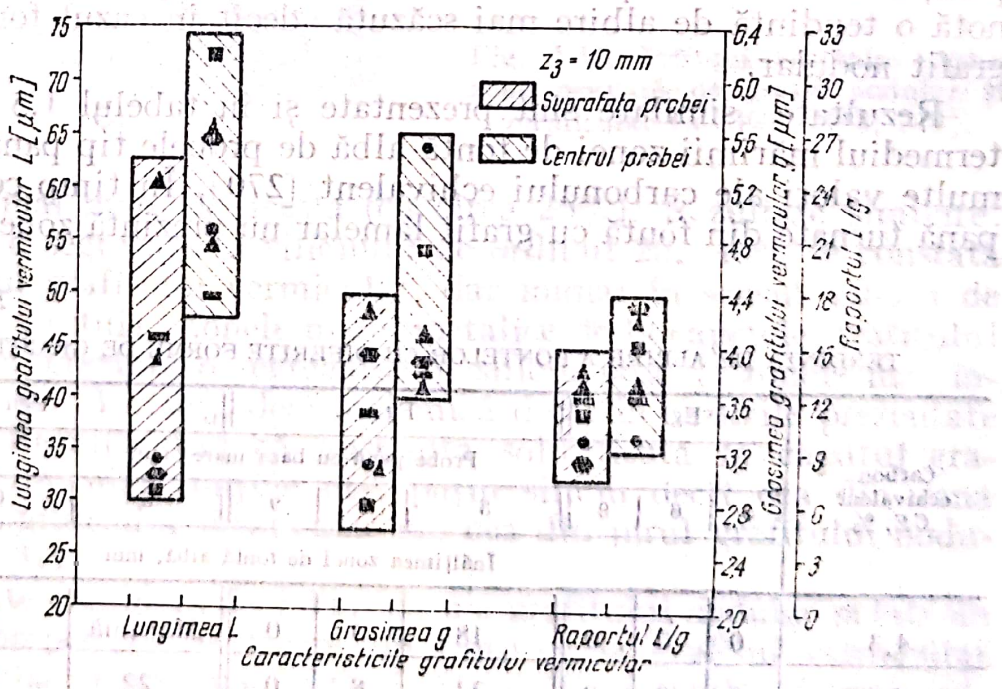


Fig. 1.17. Caracteristicile dimensionale ale grafitului vermicular, în cazul probelor cu modulul de răcire $Z = 10$ mm (semnele din diagramă indică forma secțiunii) [324].

ceea ce privesc tipurile de grafit cît și caracteristicile acestora. De asemenea, se micșorează diferențele între probele cu același modul de răcire, dar de diferite geometrii.

Prin modificarea în formă a fost posibilă obținerea pieselor cu grosimi de pînă la 2 mm fără cementită liberă în structură și cu conținuturi ridicate de ferită (peste 30%) [329].

1.2.2. Structura secundară

La aceleași condiții de fabricație (agregat de elaborare, compoziție chimică, viteză de răcire), fontele cu grafit vermicular au o sensibilitate mai mare la formarea feritei (F) la transformarea eutectoidă ca de exemplu, 90...100% F față de 50...60% F la Fgn (fig. 1.18) [308, 319].

La o fontă care conține atît grafit vermicular, cît și nodular (60% Gv și 40% Gn) zonele ocupate de către grafitul vermicular conțin 80...100% F, față de 20...30% F cît se constată în zonele cu grafit nodular (fig. 1.18, *c*). Este prezentă și anomalia feritei (fig. 1.18, *d*), care apare în structură alături de cementită.

Numărul mai mare de separări de grafit pe unitatea de suprafață, precum și distanța mai mică între acestea (cu circa 40...60% față de Fgn) favorizează procesul de difuzie a carbonului la transformarea eutectoidă și în acest mod apariția mai accentuată a feritei în cazul fontelor cu grafit vermicular (fig. 1.19, *a*).

În fig. 1.19, *b* sînt prezentate distanțele între separările de grafit, pentru cele două tipuri de fonte (60 de măsurători, pe șase direcții de măsurare) [319].

Fontele cu grafit vermicular posedă o izotropie mult mai pronunțată, dependența de grosimea de perete fiind mai redusă decît în cazul fontelor cu grafit lamelar, nemodificat și modificat (fig. 1.20).

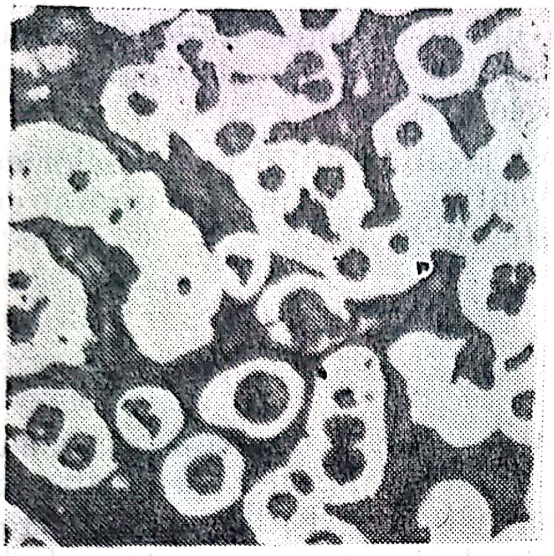
Trecerea de la o grosime de perete de la 20 mm la 50 mm determină creșterea dimensiunilor separărilor de grafit, creșterile minime fiind înregistrate la fonta cu grafit vermicular iar cele maxime la cea cu grafit lamelar (fig. 1.20, *b*).

Pentru cele trei tipuri de fonte, a fost stabilită următoarea legătură în ceea ce privește creșterea lungimii separărilor de grafit odată cu mărirea grosimii de perete a pieselor turnate [306]:

$$Fgl : Fglm : Fgv = 2{,}03 : 1{,}87 : 1. \qquad (1.12)$$

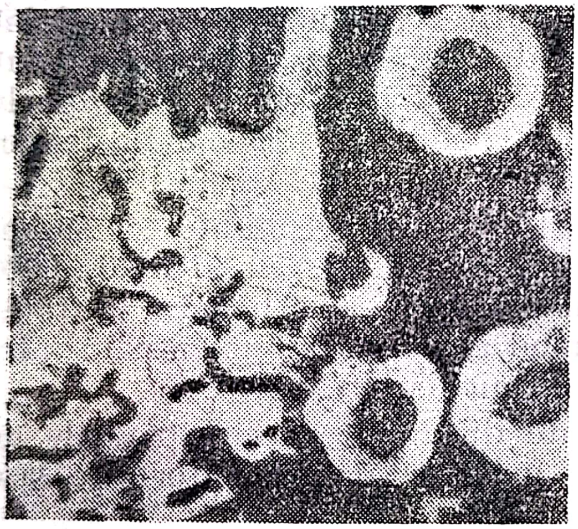
O situație asemănătoare se înregistrează și în ceea ce privește variația caracteristicilor dimensionale ale grafitului pe secțiunea pieselor turnate (fig. 1.21).

Scanned with OKEN Scanner

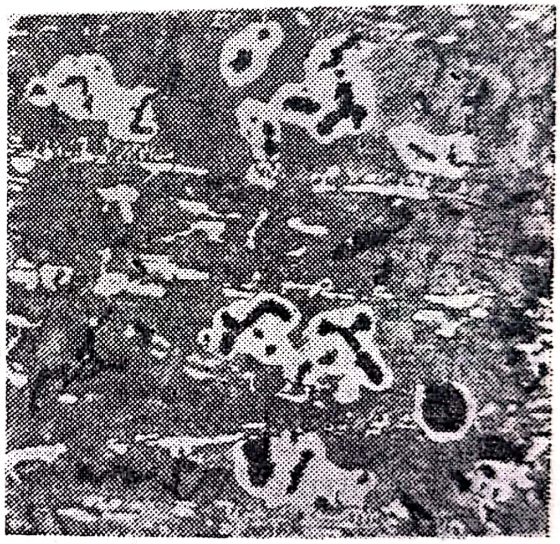


a

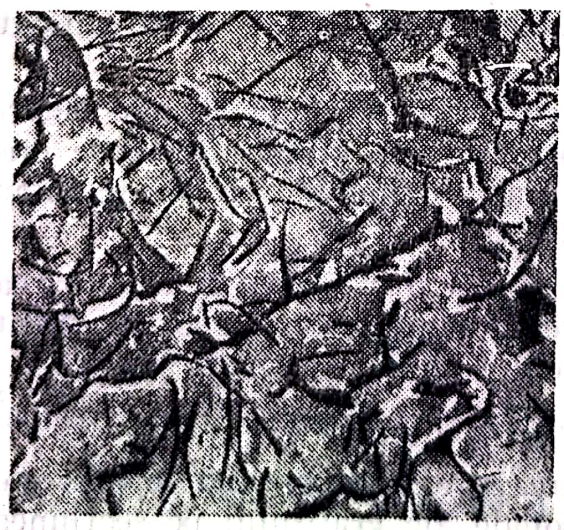
b



c



d



e

Fig. 1.18. Structuri ale unor fonte (× 100) după atac cu nital 2%:
a — Fgn (3,66% C, 2,3% Si, 0,36% Mn, 0,02% P, 0,003% S; $S_c = 1{,}03$); *b* — Fgv (3,65% C 2,6% Si, 0,32% Mn, 0,05% P, 0,008% S; $S_c = 1{,}05$); *c* — Gv + Gn; *d* — Fgv pestriță; *e* — Fgl.

Scanned with OKEN Scanner

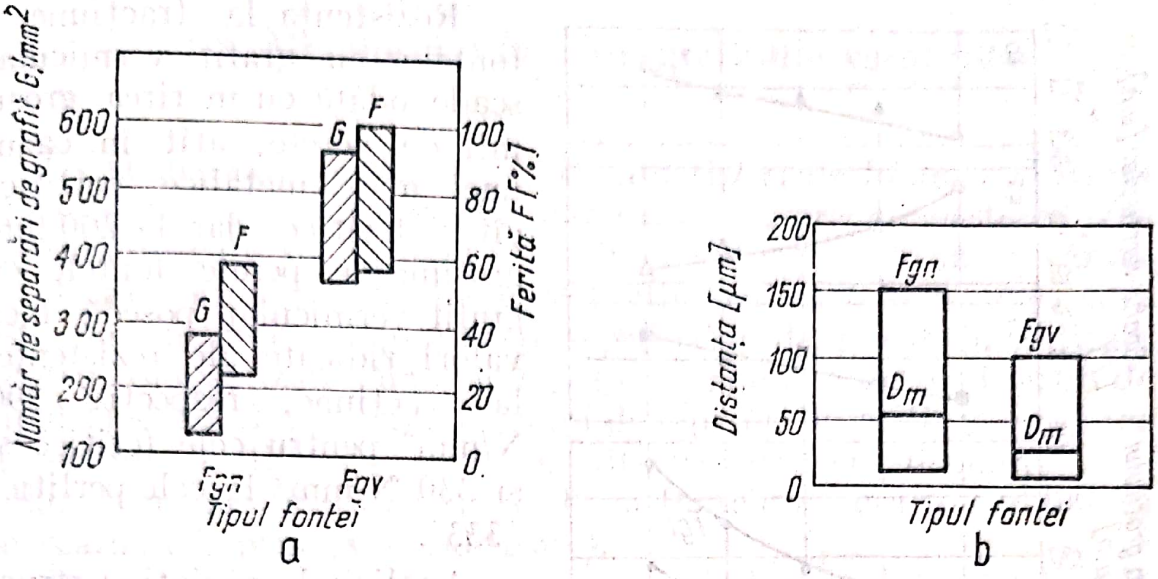


Fig. 1.19. Numărul de separări de grafit pe unitatea de suprafață și cantitatea de ferită (*a*) și distanța între separările de grafit (*b*) [319].

În cazul fontelor cu grafit vermicular micșorarea vitezei de răcire spre centrul probelor determină o mărire a raportului între lungimea L și grosimea g a grafitului, dar și în centrul termic grafitul vermicular își păstrează caracteristicile de bază.

Grafitul lamelar modificat și nemodificat, prezintă variații dimensionale mai mari, pe secțiunea piesei, decît grafitul vermicular (tabelul 1.6).

Datorită faptului că grafitul vermicular este mai puțin afectat de variația vitezei de răcire, odată cu schimbarea grosimii de perete, proprietățile fontei depind în mai mică măsură de grosimea de perete, la o masă metalică constantă [122].

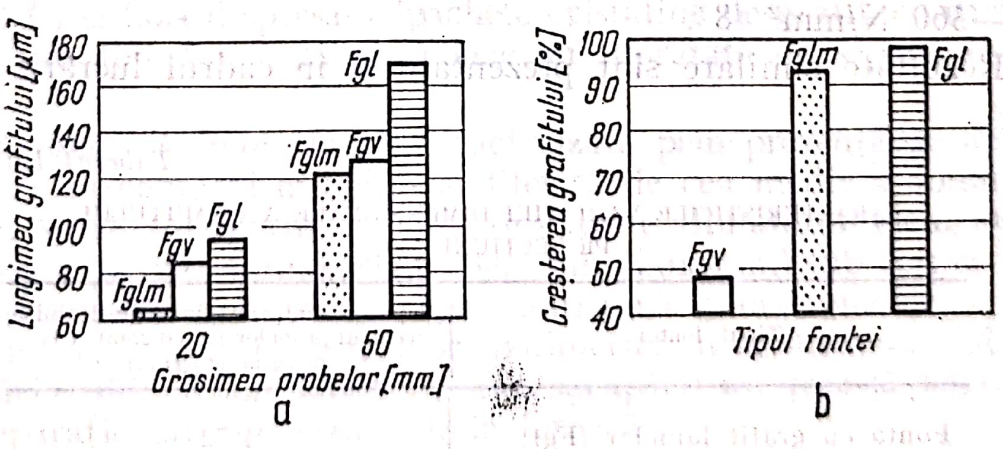


Fig. 1.20. Influența grosimii de perete asupra mărimii separărilor de grafit, la fontele cu grafit lamelar nemodificat (Fgl), modificat (Fglm) și vermicular(Fgv) [306] (timpul de la modificare la turnare, 5 min.):
a — lungimea separărilor de grafit; *b* — creșteri la 50 mm față de 20 mm grosime de perete.

Scanned with OKEN Scanner

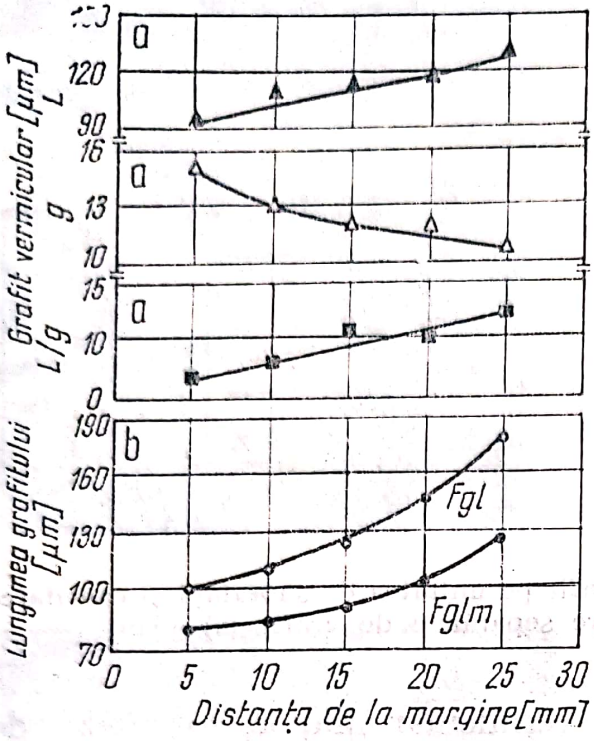


Fig. 1.21. Variația caracteristicilor dimensionale ale grafitului pe secțiunea piesei (∅ 50 mm) [307]:
a — Fgv; *b* — Fgl și Fglm.

Rezistența la tracțiune a fontelor cu grafit vermicular scade odată cu mărirea grosimii de perete, atît în cazul unei mase metalice perlitice cît și feritice, dar la 200 mm grosime de perete fontele cu grafit vermicular posedă încă valori ridicate ale rezistenței la tracțiune, respectiv 290 N/mm² pentru cele feritice și și 330 N/mm² la cele perlitice [333].

Analizînd variația structurii și durității fontelor cu grafit vemicular, la creșterea grosimii de perete în intervalul 6...50 mm, se constată [297] o dependență scăzută față de variația vitezei de răcire. La grosimi scăzute de perete apar nodule de grafit, în timp ce la grosimi mai mari scade gradul de compactitate al separărilor de grafit.

În cazul fontelor cenușii (Fc 350) creșterea grosimii de perete de la 12,5 la 100 mm determină micșorarea rezistenței la tracțiune cu 55% în timp ce la fontele cu grafit vermicular o creștere a grosimii pieselor pînă la 200 mm determină o scădere a rezistenței cu doar 25%, respectiv de la 400...460 N/mm² pînă la 320—360 N/mm² [8].

Rezultate similare sînt prezentate și în cadrul lucrării [91].

Tabelul 1.6

CARACTERISTICILE VARIAȚIEI DIMENSIONALE A GRAFITULUI PE SECȚIUNE [307]

Tipul fontei	Raportul dintre lungimea grafitului în centrul probelor (∅ 50 mm) și la margine (L_{25}/L_{05})
Fontă cu grafit lamelar (Fgl)	1,72
Fontă cu grafit lamelar modificat (Fglm)	1,56
Fontă cu grafit vermicular (Fgv)	1,38

Scanned with OKEN Scanner

1.3. Mecanismul formării grafitului vermicular

Ca și în cazul producerii celorlalte tipuri de fonte modificate și la fontele cu grafit vermicular este necesară cunoașterea mecanismului care stă la baza efectului modificator, în urma căruia se obține forma intermediară de grafit analizată și anume: care este mecanismul compactizării separărilor de grafit (modificare pentru compactizare cunoscută și sub denumirea de modificare de tipul I) și cel al măririi numărului de separări de grafit pe unitatea de volum (modificare pentru grafitizare frecvent denumită inoculare sau modificare de tipul II; la fontele cu grafit nodular ea se realizează prin postmodificare).

În toate fontele efectul modificator al elementelor introduse în baia metalică determină direct aproape toate proprietățile (mecanice, fizice, de exploatare și tehnologice) și deci trebuie luat în considerare la stabilirea tehnologiei de obținere a diferitelor mărci de fontă (alcătuirea încărcăturii, regimul de topire și supraîncălzire, viteza la răcire, tratamentul termic etc.).

Ambele tipuri de modificare (pentru compactizarea grafitului și creșterea cantității acestuia în fontă) se desfășoară sub influența directă a structurii fontei în stare lichidă.

1.3.1. Structura fontei în stare lichidă

Fonta în stare lichidă, la temperatura de supraîncălzire și turnare, poate avea o structură corespunzătoare a două tipuri:

1) *Soluție coloidală*, în care caz fonta face parte dintr-un sistem bifazic constituit din faza de dispersie (soluția lichidă de fier cu 1—2%C) și faza dispersată (pachete cristaline de grafit cu dimensiuni sub 100 A°). Cele două faze au suprafață de separație evidentă.

2) *Soluție lichidă ideală*, caracterizată prin prezența de microgrupări cu compoziție chimică diferită de cea medie a fontei lichide. Aceste microgrupări sînt constituite din atomii elementelor din fontă (mai ales din carbon, fier, sulf și oxigen,) sub forma unei game largi de forme (de la cîțiva ioni pînă la macromolecule dezvoltate, de tipul complexelor polimerice necristaline). Microgrupările de carbon (clasteri, microgrupări) nu posedă suprafețe de separație față de faza lichidă feroasă.

Ambele tipuri de soluții pot fi întîlnite la elaborarea fontei, soluția coloidală la supraîncălziri relativ scăzute, iar cea ideală, cu clasteri, la supraîncălziri avansate. Pachetele de grafit provin din componentele metalice și nemetalice ale încărcăturii (fonte

Scanned with OKEN Scanner

brute, feroaliaje, materiale pentru carburare etc.), nefiind dizolvate complet în decursul perioadei de topire și supraîncălzire.

Prezența separărilor de grafit provenit din încărcătură (grafit ereditar) este bine evidențiată de următoarele fenomene: variația accentuată a structurii și proprietăților mecanice ale fontelor cu suma (C+Si) ridicată în funcție de gradul de supraîncălzire și durata de menținere în stare lichidă; variația proprietăților sensibile (mai ales reologice) ale fontelor la menținere.

Structura fontei în stare lichidă poate deveni de tipul soluției ideale cu clasteri de carbon la supraîncălzirea avansată și menținerea îndelungată în cuptorul de elaborare (cu arc, cu inducție etc.). Ea este pusă în evidență prin interdependențe, verificate experimental, dintre activitatea termodinamică a carbonului (a_c) și conținutul lui în fontă (C), precum și prin corelația dintre oxigenul dizolvat în fontă și conținutul de carbon. Într-adevăr, conform teoriei coloidale, structura de soluție coloidală se obține atunci cînd conținutul de carbon depășește valoarea de 1,8—2,15%C (punctul de solubilitate maximă a carbonului în austenită pe diagrama Fe—C). Peste aceste valori, carbonul, la topirea încărcăturii apare sub formă de separări de grafit. Ca urmare, odată cu formarea sistemului bifazic (a soluției coloidale), valoarea activității carbonului a_c în aliaj ar trebui să rămînă constantă, nefiind influențată de creșterea conținutului de carbon (fig. 1.22, curba punctată *1* calculată pentru temperatura 1550°C a aliajului Fe-C). În realitate, valoarea a_c variază conform curbei *2*, care arată că în fonta lichidă nu apar faze grafitice nici pînă la conținuturi de 5%C (limita maximă de saturație a fierului în carbon, la temperatura menționată). Deci soluția Fe—C rămîne monofazică pentru întreg intervalul de creștere a conținutului de carbon.

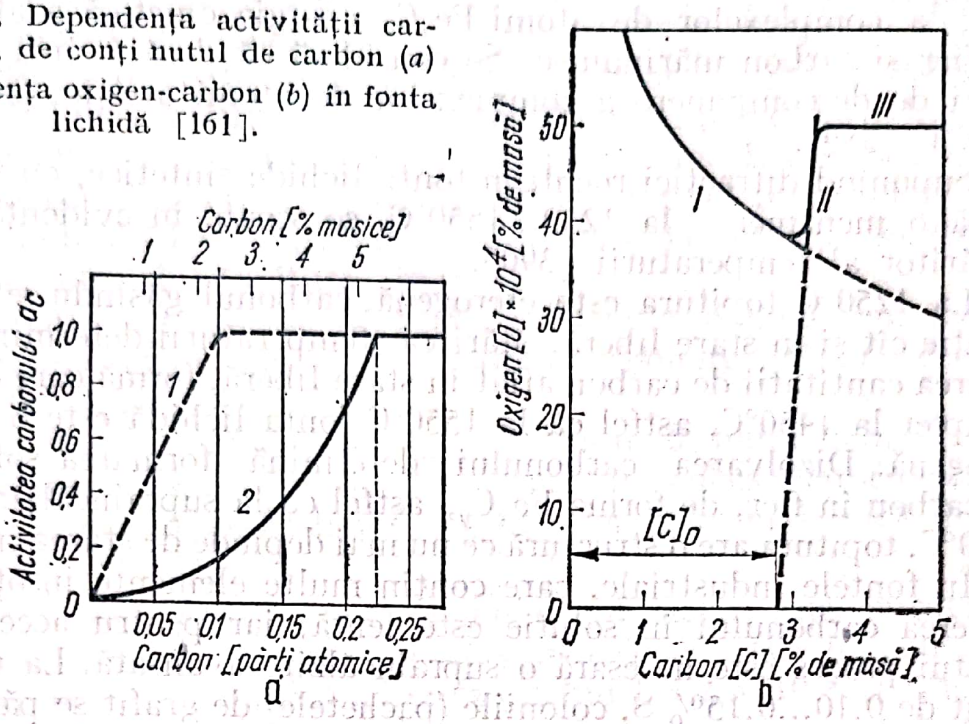
În ceea ce privește interdependența [C] — [O], aceasta nu mai este constantă (fig. 1.22, *b*): la conținuturi de carbon de cca. 3% are loc o creștere evidentă a cantității de oxigen dizolvat (vezi porțiunea *II*-a a curbei din fig. 1.22, *b* în care zona *I* indică micșorarea conținutului de oxigen ca urmare a reacției $FeO + C \rightarrow CO + Fe$, iar zona *III* a curbei — saturația fierului în oxigen).

Ambele corelații [$a_c = f(C)$ și $[O] = f(C)$] sînt explicate ținînd seama de structura, de tipul soluției lichide cu clasteri a fontei: stabilizarea microgrupărilor de carbon datorită adsorbției oxigenului pe suprafața lor, formînd macromolecule de tip $\geq C—O—$ sau $\geq C—O—C\leq$. În același mod se explică și influența sulfului asupra stabilității microgrupărilor de carbon (capacitatea mai mică de dizolvare a lor).

Analiza structurală a probelor răcite în apă de la diferite temperaturi scoate în evidență prezența unor separări de grafit în fonta

Scanned with OKEN Scanner

Fig. 1.22. Dependența activității carbonului a, de conținutul de carbon (a) și dependența oxigen-carbon (b) în fonta lichidă [161].



lichidă. Se consideră că există un domeniu de temperaturi, la 1400—1410°C, care constituie o demarcație între două zone în care faza lichidă are alte caracteristici. Pînă la acest domeniu de temperaturi, fonta lichidă este eterogenă, conținînd o mare cantitate de grafit remanent, numărul și dimensiunile acestor separări de grafit mărindu-se odată cu micșorarea gradului de supraîncălzire, față de temperatura lichidus. Supraîncălziri ale topiturii peste 1410°C favorizează difuzia carbonului, astfel că soluția devine omogenă, fără grafit remanent [156].

Analiza roentgenografică a fontei în stare solidă și după topire semnalează existența unui proces lent de dizolvare a grafitului remanent, pînă la formarea unei soluții complete de carbon în fier (fig. 1.23) [389].

În stare solidă se disting maximele pentru grafit și Fe_γ (linia *1*, fig. 1.23). După 10 min. de la topire, pe difractogramă se distinge un maximum corespunzător grafitului (linia *2*), în timp ce după 30...40 min, reflectarea grafitului lipsește (linia *3*, fig. 1.23). Dizolvarea carbonului duce la creșterea interacțiunii Fe—C, mai puternică decît Fe—Fe, acest lucru determinînd mărimea vîscozității fontei lichide. Creșterea temperaturii conduce însă la micșorarea stabilității ter-

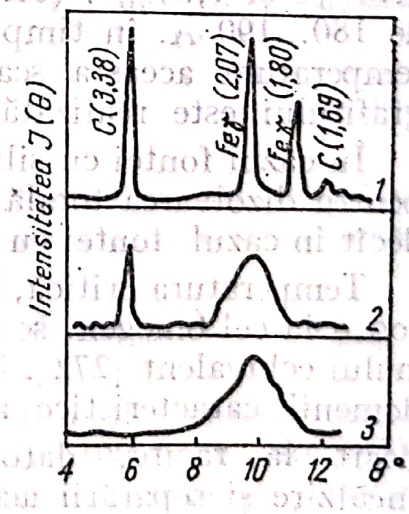


Fig. 1.23. Rentgenodifractograma fontei solide (curba *1*), la 10 min. (curba *2*) și 40 min. după topire (curba *3*) [389].

mice a complexelor de atomi Fe_xC_y energia cinetică a atomilor de fier și carbon mărindu-se. Se consideră că desăvîrșirea procesului de descompunere a complexelor de atomi are loc la peste 1320°C [389].

Supunînd difracției roentgen fonte lichide sintetice, cu 4,1%C, după o menținere la 1250...1550°C, se scoate în evidență rolul hotărîtor al temperaturii [390].

La 1250°C topitura este eterogenă, carbonul găsindu-se atît în soluție cît și în stare liberă. Mărirea temperaturii determină micșorarea cantității de carbon aflat în stare liberă, formă care dispare complet la 1450°C, astfel că la 1550°C fonta lichidă este o soluție omogenă. Dizolvarea carbonului determină formarea soluțiilor de carbon în fier, de forma Fe_xC_y, astfel că la supraîncălziri peste 1450°C, topitura are o structură ce nu mai depinde de starea inițială.

În fontele industriale, care conțin multe elemente însoțitoare, trecerea carbonului în soluție este lentă, iar pentru accelerarea acestui proces este necesară o supraîncălzire avansată. La un conținut de 0,10...0,15% S, coloniile (pachetele) de grafit se păstrează încă multă vreme, la supraîncălziri avansate (1500°C), datorită faptului că atomii de sulf, adsorbiți la suprafața lor, măresc stabilitatea acestora [390].

O structură stabilă a fontei lichide aflată la o temperatură apropiată de cea de topire se obține după 10—20 h, iar în urma supraîncălzirii cu 300...400°C după numai 2...5 h [417].

În cazul unor fonte de cubilou cu 3,22%C și 2,69% Si (CE = 4,08%), raza domeniului în care grafitul nu este dizolvat, imediat după topire, este de 30...35 Å.

Raza particulelor de grafit, în cazul unei fonte sintetice cu 4,14%C și 1,04%Si (CE = 4,48%), după topirea la 1 220°C este de 180...190 Å, în timp ce după 5...6 h de menținere la această temperatură aceasta scade la jumătate. Dizolvarea completă a grafitului este realizată la 10...12 h așteptare.

În cazul fontei cu siliciu scăzut (0,02%Si), durata de așteptare pentru dizolvarea totală a grafitului este de 2...3 ori mai mică, decît în cazul fontei cu 1,04% Si [417].

Temperatura critică, la care are loc trecerea de la sistemul eterogen la cel omogen, se mărește, odată cu creșterea valorii carbonului echivalent [272]. Temperatura critică, care separă cele două domenii caracteristice ale topirii, este mai înaltă la încălzire decît la răcire, datorită cineticii dizolvării grafitului la încălzire și separării acestuia la răcire.

Urmărind variația densității, s-a constatat că în intervalul 1350...1475°C variația cu temperatura se abate de la o dependență liniară, care poate fi explicată tocmai prin dizolvarea grafitului. La supraîncălziri înalte (> 1500°C) topitura interacționează cu

Scanned with OKEN Scanner

căptușeala cuptorului cu formare de gaze, ceea ce poate explica scăderea densității [272].

Valorile superioare ale densității fontelor cu grafit nodular (în stare lichidă), în raport cu cele cenușii sînt explicate prin faptua că magneziul este adsorbit la suprafața pachetelor de grafit, cărora le micșorează rezistența, accelerînd în acest mod dispersarea lor în fonta lichidă. Deci magneziul contribuie la mărirea solubilității grafitului în topitură [163].

Eliminarea separărilor de grafit din fonta lichidă este datorată nu numai procesului de dizolvare a carbonului, cît și ascensiunii (flotării) acestora.

Viteza de ascensiune (flotare) a grafitului în fonta lichidă este mai mare decît cea rezultată din legea lui Stokes, datorită faptului că la limita grafit-lichid vîscozitatea este mai mică decît în volumul lichidului.

În cazul unor fonte cu grafit nodular și lamelar, hipereutectice, au fost efectuate o serie de calcule pentru $T = 1\,600°K$, considerînd diferența interatomică a fierului lichid $l = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$ cm [443].

Raportul între vîscozitatea dinamică la limita cu particulele de grafit (μ_G) și în volumul fontei lichide (μ) poate fi calculat cu relația

$$\frac{\mu_G}{\mu} = exp\,[-\alpha \cdot \pi\, l^2 \cdot \sigma\,(1-\cos\,\theta)/R \cdot T], \qquad (1.13)$$

în care: α este o constantă; σ — tensiunea superficială a lichidului; θ — unghiul de umectare a lichidului; R — constanta Boltzman; l — distanța medie între particule.

S-a constatat că vîscozitatea la limita cu nodulele de grafit este mult mai scăzută decît cea la limita lamelelor de grafit.

Distanța (λ) între particulele de grafit, în condițiile în care acestea sînt uniform distribuite în volumul fontei este

$$\lambda = \frac{H - d \cdot i}{i + 1}\ [\text{m}], \qquad (1.14)$$

în care: d este diametrul particulei de grafit, în m; H — înălțimea băii metalice, în m; i — numărul de particule pe înălțimea băii, determinat stereometric.

La diametre ale particulelor $d = 10^{-8}...10^{-3}$ m și $\Delta T = T_{lich} - T = 1...400°C$, se obține $1{,}3 \cdot 10^4 \cdot d \geqslant \lambda \geqslant 31 \cdot d$.

În condiții practice, a fost determinat timpul de ascensiune a particulelor de grafit, în cazul unei oale de 100 t, în care înălțimea lichidului a fost de 3 m, iar diametrul mediu al particulelor de grafit $d = 10^{-5}$ m.

În ceea ce privește vîscozitatea $\mu_{(Fgn)} = 0{,}75 \cdot \mu_{(Fgl)}$. Pentru fonta cu grafit nodular a rezultat un timp de 6,6 min, iar pentru

Scanned with OKEN Scanner

cea cu grafit lamelar 2,3 h, față de 7,8 h și respectiv 55,1 h cît ar rezulta din formula lui Stokes.

În cazul fontei cu grafit nodular, viteza de flotare a grafitului este deosebit de accentuată.

Urmărind procesul de topire a fontei, se constată că grafitul se dizolvă mai încet decît are loc topirea masei metalice, grafitul primar din fontele de primă fuziune (kish-grafit) nedizolvîndu-se complet, rămînînd sub formă de pachete de grafit [343].

Unii autori [161, 347] consideră însă că fonta lichidă nu are caracter de soluție coloidală, acceptînd însă existența mai *multor tipuri de eterogenități* în ceea ce privește distribuția carbonului.

1) *Neomogenitate de concentrație, datorită fluctuațiilor obișnuite*, în condițiile în care legăturile C—C sînt slabe (domenii de carbon scăzut).

2) *Neomogenitate de concentrație, determinată de forța de legătură C—C* (sub influența termodinamicii soluțiilor Fe—C, Fe—Si, Fe—C—Si) pînă la valori la care este posibilă apariția diferitelor combinații, ca de exemplu cele rezultate din pătrunderea atomilor de fier între planele grafitului ($Fe_x C_y$).

3) *Adsorbția carbonului pe suprafața diferitelor incluziuni nemetalice*, care se păstrează pînă la supraîncălziri destul de mari, constituind germeni de grafitizare.

d) *Grafitul remanent*, respectiv resturile separărilor de grafit din încărcătură, încă nedizolvate. A fost arătat faptul că mărirea gradului de supraîncălzire și a duratei de menținere la aceste temperaturi determină dizolvarea grafitului remanent. Trebuie însă remarcat faptul că în cazul fontelor tehnice, dizolvarea acestuia are loc destul de lent, datorită faptului că la suprafața pachetelor de grafit sînt adsorbite gaze și elemente însoțitoare.

La fontele de turnătorie, primele două neomogenități se referă la nivelul atomilor complecșilor și macromoleculelor, iar cea de a treia la interacțiunea primelor două cu suprafața incluziunilor nemetalice.

Se poate deci considera că cele două teorii privind structura fontei lichide nu se exclud reciproc ci din contră, se completează, astfel că fonta lichidă poate fi considerată ca fiind un sistem complex, multicomponent, în continuă schimbare, aflat sub influența unei mulțimi de factori.

Luînd în considerare componența încărcăturii și compoziția chimică a fontei, viteza și gradul de supraîncălzire, durata de menținere la temperaturi ridicate și scăzute, viteza de răcire etc., se pot presupune o serie de *schimbări* care apar în timpul topirii și menținerii fontei în stare lichidă precum și la răcire:

a) *După topire*, fonta lichidă conține separări de *grafit remanent*, provenit din fontele utilizate în încărcătură sau materialele car-

Scanned with OKEN Scanner

bonice folosite pentru carburare. Aceste separări de grafit (pachete), cu dimensiuni de ordinul 10...100 Å, se găsesc într-un număr mai mare decît incluziunile nemetalice.

b) La *suprafața* pachetelor de *grafit* se găsesc *adsorbite* o serie de *elemente*, o parte din ele, cum ar fi oxigenul și sulful, titanul și aluminiul etc., formînd compuși cu carbonul.

c) În timpul *menținerii* sau *supraîncălzirii* fontei lichide are loc un proces de *dizolvare a carbonului*, astfel încît separările de grafit remanent dispar, topitura pierzînd caracterul de soluție coloidală. Domeniul de temperaturi la care se realizează trecerea de la o soluție coloidală (eterogenă) la o soluție omogenă este de 1400...1450°C. Procesul de dizolvare a grafitului remanent este cu atît mai intens, cu cît mneținerea în stare lichidă a fontei este mai îndelungată.

d) Compoziția chimică a fontei lichide influențează în mare măsură procesul de dizolvare a grafitului remanent. *Mărirea* valorii *carbonului echivalent* determină creșterea *temperaturii critice*. Micșorarea conținutului de siliciu al topiturii accelerează procesul de dizolvare a carbonului din grafitul remanent.

Sulful, adsorbit la suprafața pachetelor de grafit, le mărește stabilitatea, fenomen ce are loc și sub acțiunea altor elemente. Sînt însă și elemente, cum ar fi magneziul, care determină dezagregarea pachetelor de grafit, favorizînd în acest mod dizolvarea lor.

e) La temperaturi superioare domeniului critic, se formează o soluție de carbon în fierul lichid, dar există posibilitatea existenței unor combinații carbonice, în majoritatea cazurilor împreună cu fierul (Fe_xC_y), care însă nu mai sînt faze cu suprafețe propriu-zise de separație cu lichidul, așa cum erau pachetele de grafit.

f) Supraîncălziri mari în raport cu domeniul critic de temperaturi determină micșorarea stabilității termice a complexelor de atomi de tipul Fe_xC_y, energia cinetică a atomilor de fier și carbon mărindu-se, astfel că la peste 1550°C se poate vorbi despre o soluție omogenă.

1.3.2. Mecanismul obținerii separărilor compacte de grafit

Elementele modificatoare care determină compactizarea separărilor de grafit în procesul de germinare și creștere a acestora sînt identice cu cele folosite la producerea fontei cu grafit nodular: Mg, Ce, Y și EPR (elementele din grupa pămînturilor rare, lantanide și actinide).

În fig. 1.24 este prezentată poziția elementelor modificatoare în tabelul lui Mendeleev, iar în fig. 1.25 poziția lor în funcție de capacitatea de dizolvare în carbon și fier.

Scanned with OKEN Scanner

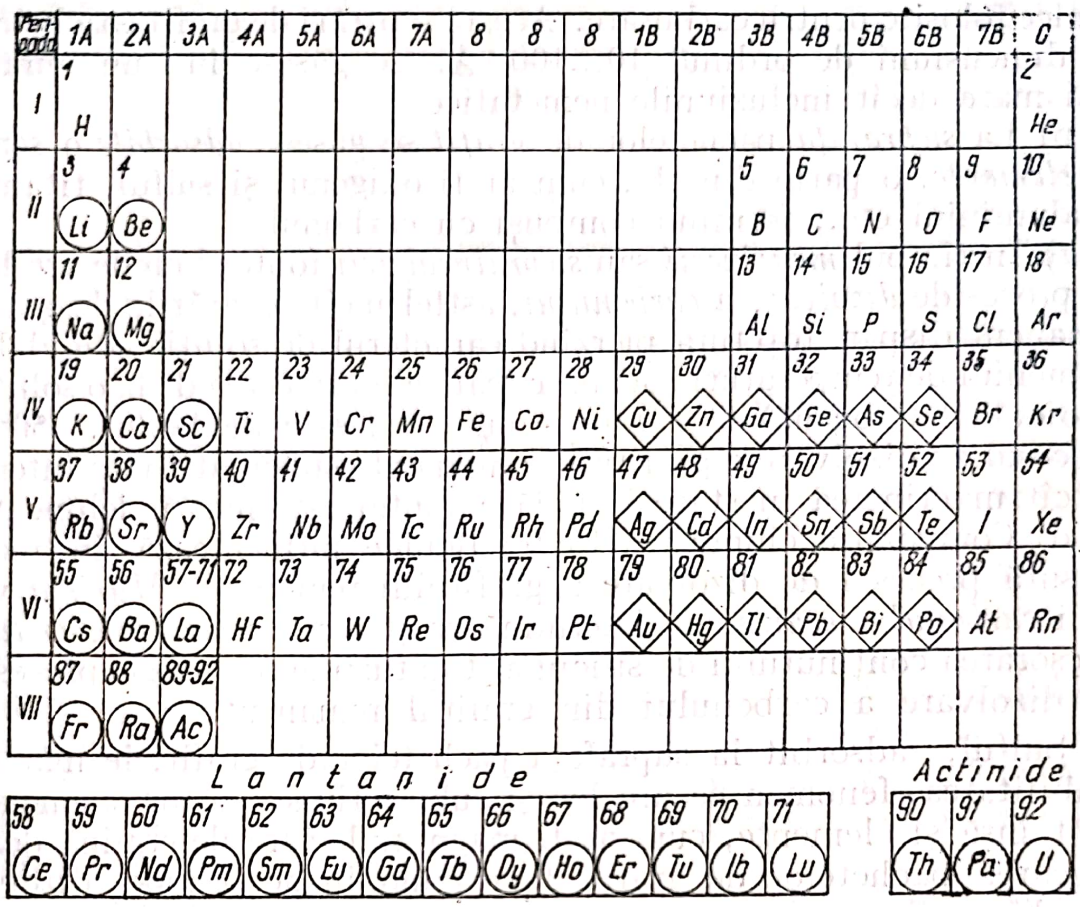


Fig. 1.24. Poziția elementelor nodulizante (cercuri) și a celor antinodulizante (romburi) în tabelul lui Mendeleev [232].

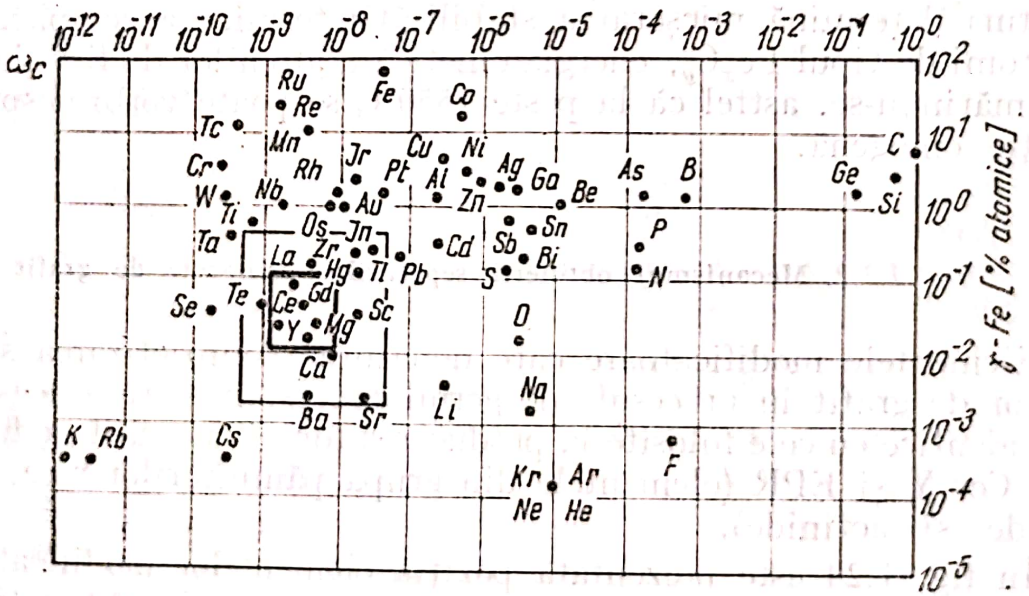


Fig. 1.25. Interdependența dintre capacitatea de dizolvare a elementelor în Fe γ și coeficientul de distribuție în carbon [111].

Scanned with OKEN Scanner

Aceste clasificări fac posibilă caracterizarea generală a elementelor modificatoare din punctul de vedere al configurației lor electronice și al razei atomice. Pentru elementele modificatoare la nivelul orbitelor S^1 și S^2 sînt prezenți 1—2 electroni, la nivelurile *s* și *p* — cîte 8 electroni, (deci niveluri completate), iar la nivelurile *d* și *f* — necompletate.

Pentru realizarea formei separărilor de grafit cu compactitate intermediară sînt folosite uneori elemente antimodificatoare (în principal Ti, Bi), caracterizate printr-un număr diferit de doi electroni pe orbite de valență (de ex. cinci pentru Bi și unul pentru Cu), iar în rest printr-un număr de 18 electroni pentru nivelurile *s*, *p* și *d*, care sînt completate.

Obținerea grafitului vermicular, care are o compactitate intermediară, se bazează pe un proces de nodulizare incompletă și deci modul de influență a elementelor modificatoare și antimodificatoare este analog celui întîlnit la obținerea fontelor cu grafit nodular.

La fontele cu grafit vermicular pot fi întîlnite două scheme ale mecanismului de modificare pentru compactizarea grafitului, în comparație cu fonta cu grafit nodular:

— folosirea numai a elementelor modificatoare, dar în proporție mai redusă, în care caz nu se atinge gradul maxim de modificare;

— folosirea concomitentă a elementelor modificatoare la conținuturi suficiente pentru nodulizarea grafitului, alături de elemente antimodificatoare, capabile să neutralizeze influența pozivă a celor dintîi; cu alte cuvinte conform acestei scheme au loc concomitent două procese de nodulizare și de degenerare a nodulelor de grafit.

Rezultă că elementele modificatoare sînt folosite ca mijloc obligatoriu de realizare a compactității prescrise a separărilor de grafit.

Se cunoaște că în condițiile fontelor tehnice forma naturală a separărilor de grafit este lamelară ca urmare a faptului că viteza de creștere (v_A) a grafitului în direcția axei *a* (perpendicular pe muchia prismei) este mai mare față de direcția axei *c* (perpendicular pe hexagonul de bază al rețelei, caracterizată prin viteza v_C).

Viteza de creștere a grafitului, în condiții reale de solidificare, este dată de relația [45]

$$v = \frac{3 \cdot \Delta S^2 \cdot K \cdot \Delta T^2 \cdot T}{8 \pi^2 V R \sigma \eta r}, \qquad (1.15)$$

în care: ΔS este diferența de entropie între fazele solide și lichide; ΔT — gradul de subrăcire; T — temperatura; V — volumul molar; σ — tensiunea interfazică în sistemul cristal-topitură; η — vîscozitatea fontei; r — raza ionului de carbon; K — constanta Boltzman; R — constanta gazelor.

Scanned with OKEN Scanner

Rezultă deci că la creșterea gradului de subrăcire și la micșorarea vîscozității și tensiunii interfazice, viteza de creștere a separărilor de grafit se mărește.

Tensiunea interfazică σ depinde de tensiunea superficială a grafitului, conform relației:

$$\sigma = \sigma_G - \cos 0 \cdot \sigma_0, \qquad (1.16)$$

în care: σ_G este tensiunea superficială a grafitului; 0 — unghiul de umectare grafit-lichid; σ_0 — tensiunea superficială a fontei.

Tensiunea superficială a grafitului (σ_G) prezintă valori de circa 4300 erg/cm² pe planul de bază (0001) și de 290 erg/cm² pe planele (1010), la un unghi de umectare $0 = 130°$.

În condițiile în care, la 1300°C, fontele hipoeutectice au tensiunea superficială $\sigma_0 = 1100$ erg/cm² rezultă:

$$\sigma_{L-G(0001)} = 4300 + 0{,}64.1100 \approx 4900 \text{ erg/cm}^2,$$
$$\sigma_{L-G(1010)} = 290 + 0{,}64.1100 \approx 900 \text{ erg/cm}^2.$$

Raportul vitezelor de creștere a grafitului, în cele două direcții, devine: $v_{(1010)} : v_{(001)} \approx 5{,}5$, astfel că se obține grafit lamelar.

Elementele modificatoare (Mg, Ce, Ca) introduse în fontă reacționează cu oxigenul și sulful, pe care le îndepărtează de la suprafața separărilor de grafit, determinînd o creștere a tensiunii superficiale cu 450...500 erg/cm². Sub acțiunea elementului modificator, unghiul de umectare crește la $0 = 140°$. Concomitent are loc și o micșorare a vîscozității.

Datele prezentate în tabelul 1.7 ilustrează legătura între conținutul de oxigen și sulf al fontei, tensiunea superficială și forma grafitului [12].

Așadar, la fontele cu grafit lamelar, $v_P > v_B$ (fig. 1.26).

Elementele modificatoare de compactizare schimbă raportul dintre v_P și v_B în sensul că v_P să devină egal cu v_B sau chiar să fie mai mic ($v_P < v_B$).

Schimbarea vitezei de creștere într-o direcție sau alta a rețelei cristaline a grafitului poate fi realizată în principal pe două căi:

— variația tensiunii interfazice la cristalizarea fontei;

— variația gradului de subrăcire la cristalizarea fontei.

Tensiunea interfazică exprimă de fapt stabilitatea fazei lichide la cristalizare și deci tendința de subrăcire.

Elementele modificatoare nodulizante introduse în fontă acționează direct asupra microgrupărilor de grafit (clasteri) existenți în faza metalică lichidă, intrînd în reacție cu atomii de sulf și oxigen. Ambele elemente sînt puternic active superficial și formează legături puternice cu atomii de carbon din clasteri sau din fazele grafitice, obținîndu-se macromolecule de tip $\diagup\!\!\diagdown C—O—$ și $\diagup\!\!\diagdown C—O—C\diagup\!\!\diagdown$.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.7

INFLUENȚA TENSIUNII SUPERFICIALE ASUPRA FORMEI GRAFITULUI

Nr. probă	Compoziția chimică, %					Oxigen %	Conținut remanent de modificator %	Tip grafit	ΔT °C	σ_{L-A} Mj/m²	σ_{L-G} (0001) Mj/m²	σ_{L-G} (1010 Mj/m²)
	C	Si	Mn	P	S							
1	3,68	2,20	0,31	0,028	0,019	0,0036	—	G1	—	1030	202	72
2	3,65	2,40	0,30	0,027	0,006	0,0032	0,05 PR	G1	—	1360	706	539
3	3,60	2,50	0,40	0,025	0,006	0,0017	0,10 PR	Gv	9	1400	1010	958
4	3,54	2,60	0,35	0,030	0,005	0,0016	0,12 PR	Gv +15% Gn	12	1440	1058	1020
5	3,73	2,65	0,70	0,065	0,005	0,0014	0,06 Y	Gv +30% Gn	15	1470	1072	1044
6	3,72	2,70	0,65	0,068	0,005	0,0010	0,10 Y	Gv +50% Gn	19	1520	1108	1090
7	3,62	2,65	0,73	0,065	0,004	0,0008	0,15 Y	90% Gn	24	1600	1246	1349
8	3,52	2,89	0,33	0,001	0,004	0,0007	0,09 Mg	100% Gn	27	1622	1242	1390

(ΔT — gradul de subrăcire al fontei); σ_{L-A} — tensiunea superficială lichid—atmosferă; σ_{L-G} — tensiune interfazică lichid—grafit, pe planele (0001 și (1010)

Așa se explică creșterea solubilității carbonului în fonta lichidă odată cu creșterea conținutului de carbon.

Prezența compușilor S-C și O-C de la suprafața pachetelor de grafit determină mărirea stabilității acestora la supraîncălziri și menținere.

Adsorbția atomilor de sulf și oxigen se realizează la legăturile libere σ ale macromoleculelor de grafit-fier (fig. 1.27).

Elementele modificatoare, caracterizate printr-o afinitate mare față de sulf și oxigen, determină eliminarea straturilor superficiale de adsorbție de la suprafața microgrupărilor de grafit și prin aceasta provoacă creșterea gradului de saturație a fontei în carbon și mărirea tensiunii superficiale fontă lichidă — atmosferă și odată cu aceasta, a tensiunii interfaciale grafit-fază metalică lichidă.

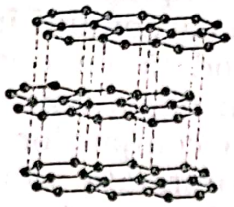
În fig. 1.28 se arată schematic modul de variație a valorilor acestor tensiuni, a conținutului de sulf și oxigen din fontă, precum și a gradului de compactitate al separărilor de grafit.

Această schemă explică efectul de compactizare obținut prin introducerea elementelor modificatoare în fonta lichidă.

El constă din următoarele procese:

— micșorarea conținutului de sulf și oxigen din fontă și deci de la suprafața microgrupărilor de grafit (clasteri, faze

Scanned with OKEN Scanner



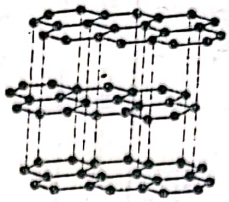
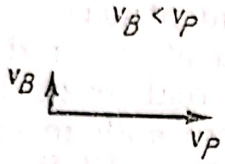
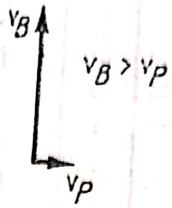


Fig. 1.26. Direcțiile de creștere a separărilor de grafit [135].

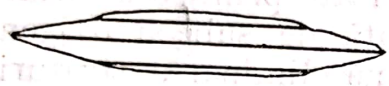


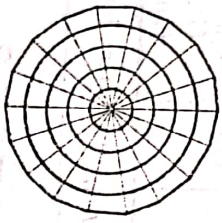
Grafit lamelar

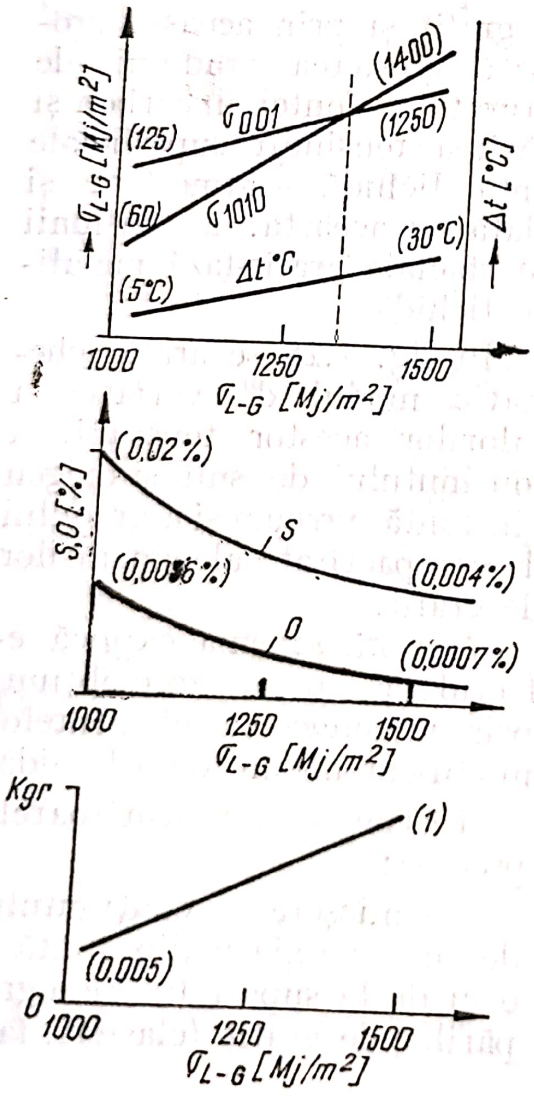


Grafit nodular

Fig. 1.27. Structura complexului macromolecular Fe-C [161].







grafitice); sulful și oxigenul formează compuși cu elementele modificatoare (de ex., MgS, MgO);

— creșterea tensiunii superficiale a fontei lichide în contact cu aerul (σ_{L-A}), datorită reducerii conținutului elementelor activ-superficiale (sulf și oxigen); astfel, tratarea fontelor cenușii cu ceriu determină mărirea σ_{L-A};

— creșterea valorii tensiunii interfazice dintre microgrupările de grafit și faza metalică lichidă (soluție ideală Fe-C), datorită de asemenea, micșorării conținutului de oxigen și sulf de la interfețele grafit-lichid (σ_{L-G});

Fig. 1.28. Reprezentarea schematică a influenței elementelor modificatoare asupra tensiunii interfazice lichid-grafit, lichid-aer (*a*), asupra conținutului de sulf și oxigen (*b*) și asupra compactității grafitului (*c*).

— modificarea determină creșterea cu precădere a tensiunii interfazice σ_{L-G} în direcția axei c, perpendiculară pe fețele prismatice ale rețelei grafitului [$\sigma_{L-G(1010)}$] caracterizate printr-un număr mai mic de atomi de carbon și deci printr-o compactitate mai mică; tocmai la aceste interfețe pot fi mai ușor eliminați atomii de sulf și oxigen.

— creșterea gradului de subrăcire (ΔT) la cristalizarea eutectică a fontei.

Experimentările efectuate special în acest scop [12] au evidențiat în mod convingător mecanismul modificării fontelor în cazul introducerii elementelor din grupa pămînturilor rare (v tabelul1.7):

— fontele nemodificate sau insuficient modificate cu grafit lamelar (v. poz. 1—2 din tabelul 1.7) sînt caracterizate prin valori scăzute atît ale tensiunii superficiale (σ_{L-A}) cît și ale tensiunilor interfazice grafit-lichid (σ_{L-G}). Raportul $\sigma_{L-G(001)}/\sigma_{L-G(1010)}$ este de cca 3;

— fontele modificate cu o cantitate mai mare de modificator sînt caracterizate prin valori mai mari ale σ_{L-A} și σ_{L-G}; raportul $\sigma_{L-G(001)}/\sigma_{L-G(1010)}$ devine aproape egal cu 1; fontele se obțin cu grafit vermicular;

— fontele modificate cu cantități mai mari de modificator au valorile tensiunilor interfazice mai ridicate, iar raportul $\sigma_{L-G(001)}/\sigma_{L-G(1010)}$ devine subunitar; grafitul se obține nodular.

Așadar, în comparație cu fonta cu grafit lamelar, fonta modificată în vederea obținerii grafitului vermicular se caracterizează printr-un conținut mai scăzut de oxigen și sulf, valoare mai ridicată a tensiunii superficiale, nivel relativ scăzut al gradului de subrăcire ΔT și ridicat al tensiunilor interfazice cu condiția ca $\sigma_{L-G(001)}$ să se mențină ceva mai mic decît $\sigma_{L-G(1010)}$.

Date similare sînt prezentate de Herfurth, K. [135]

Din fig. 1.29 rezultă că la fontele cu grafit nodular caracterizate prntr-un conținut redus sau chiar egal cu zero de impurități adsorbite la suprafața germenilor de grafit, tensiunea interfazică la baza hexagonului de grafit este mai mică decît cea de la fața prismei. Din contră, la fontele cu grafit lamelar caracterizate prin conținuturi mai mari de oxigen și sulf, $\sigma_{L-G(001)} > \sigma_{L-G(1010)}$ ($\sigma_B > \sigma_p$).

Rezultă că în fontele tehnice, impuritățile activ superficiale (oxigenul și sulful) sînt adsorbite cu precădere pe suprafețe cu densitate mai mare în atomi de carbon ale clasterilor sau pachetelor de grafit. La aceste suprafețe sînt cele mai multe posibilități de realizare a legăturilor σ, care conduc la formarea de punți cu macromoleculele de Fe-C. În aceste condiții viteza de creștere a grafitului va fi mai mare în direcția perpendiculară pe fețele prismei, la care sînt adsorbite mai puține impurități.

Scanned with OKEN Scanner

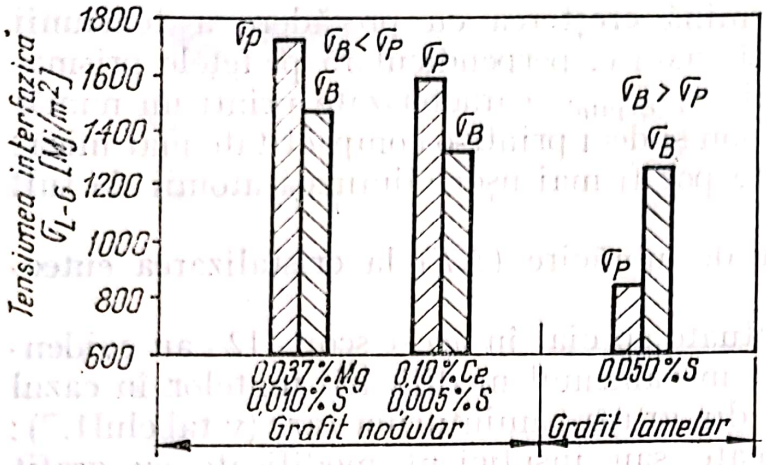


Fig. 1.29. Valorile tensiunii interfazice soluție metalică lichidă — grafit [135].

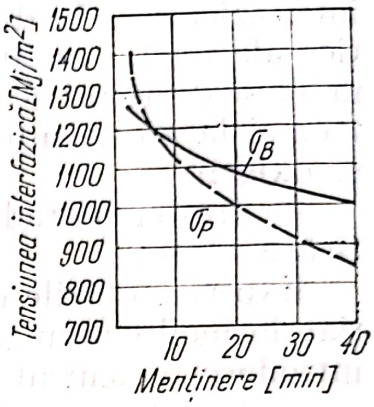


Fig. 1.30. Variația tensiunii interfazice lichid-grafit la menținerea în stare lichidă a fontei modificate [135].

Modificarea conduce la ruperea legăturilor C-O sau C-S, tocmai a suprafața fețelor prismei, unde densitatea atomilor de carbon este mai mică. Astfel se explică dependența mare a σ_p de conținutul de sulf și oxigen

iri Așadar, fontele cu grafit lamelar (cu impurități) sînt caracte-

zate prin:

$$n_B < n_p;\ \sigma_B > \sigma_p \text{ și } v_B < v_p;$$

ar fontele modificate (cu grafit vermicular sau nodular) prin:

$$n_B > n_p;\ \sigma_B < \sigma_p \text{ și } v_B > v_p.$$

Sînt unele argumente care justifică mecanismul de compactizare menționat, ca de exemplu:

— variația diferențiată a valorilor tensiunilor interfazice lichid-grafit la menținerea fontelor modificate cu grafit compact în stare lichidă; experimentările efectuate arată că și la menținere tensiunea σ_p variază într-o măsură mai mare față de σ_B (fig. 1.30), ceea ce se explică prin adsorbția preferențială a elementelor activ-superficiale din fontă pe muchiile rețelei grafitului de pe fețele prismatice;

— variația formei separărilor compacte de grafit în cazul introducerii în fonta lichidă a elementelor antimodificatoare;

— variația gradului de subrăcire la cristalizarea fontei în funcție de valoarea tensiunilor interfazice.

În general se consideră că obținerea diferitelor forme de grafit este direct legată de valoarea tensiunii interfazice între lichid și fețele prismei grafitului: Gn — peste 1150...1250 Mj/m²; Gv — la valori de 1000...1100 Mj/m² și Gl — sub 1100 Mj/m².

Scanned with OKEN Scanner

Menținerea fontei după modificare determină schimbări în valorile tensiunilor interfazice, astfel că se poate explica și pierderea efectului modificator. Imediat după modificare, $\sigma_{L\text{-}G(1010)} > \sigma_{L\text{-}G(0001)}$, iar grafitul este nodular. În timpul menținerii fontei în stare lichidă, scade conținutul de magneziu, iar în topitură pătrunde oxigen, acesta fiind adsorbit pe fețele prismei grafitului, ceea ce determină scăderea valorii tensiunii interfazice $\sigma_{L\text{-}G(1010)}$ și deci mărirea vitezei de creștere a grafitului, perpendicular pe fețele prismei. Schimbarea raportului între cele două tensiuni interfazice lichid-grafit poate determina pierderea gradului de compactitate. În mod similar se poate explica și acțiunea elementelor antimodificatoare, care au o comportare asemănătoare cu cea a oxigenului și sulfului.

Tensiunea superficială a fontei lichide ($\sigma_{L\text{-}A}$) poate fi mărită și sub acțiunea altor elemente dezoxidante, cum ar fi aluminiul, dar acest lucru nu determină schimbarea formei grafitului, deoarece nu se realizează schimbările impuse în ceea ce privește tensiunea interfazică lichid-grafit, ci doar la nivelul lichid-atmosferă. Acțiunea tensiunii interfazice lichid-grafit, cu valori diferite pe fețele prismei și pe planul bazal este susținută de mulți alți autori [230, 235, 248, 337]

În fig. 1.31 este prezentată schema de formare a celulelor eutectice în cazul grafitului lamelar, nodular și vermicular, sub acțiunea impurităților [337]. Se consideră că în aliajele Fe-C-Si, pure, starea naturală de creștere a grafitului este cea sferoidală, datorită tensiunii superficiale ridicate, în timp ce sub acțiunea impurităților, prezente în fontele tehnice, are loc un proces de degenerare a grafitului, având ca rezultat formarea grafitului vermicular (fig. 1.31, *c*).

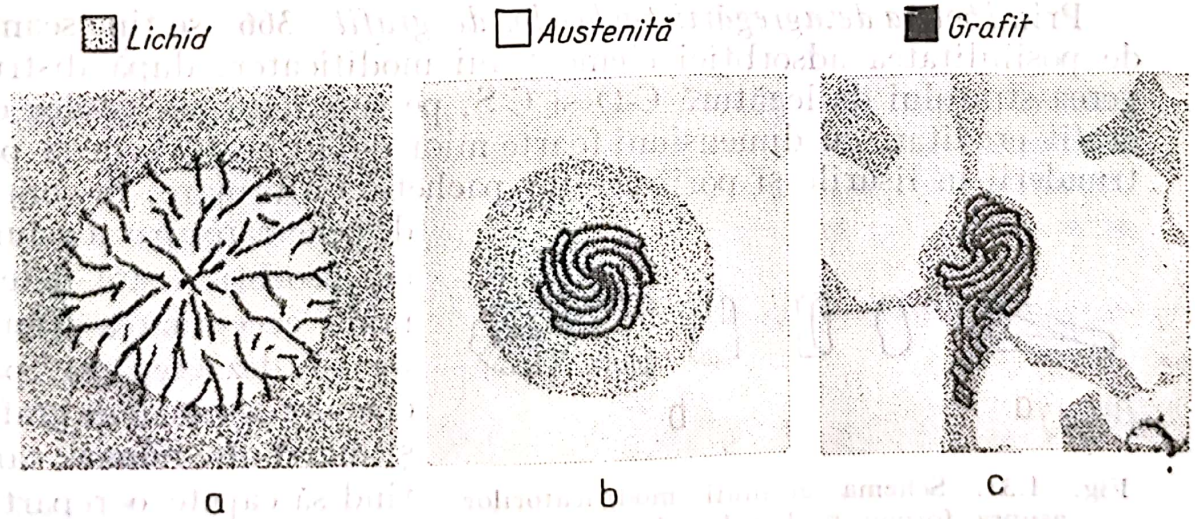


Fig. 1.31. Schema de creștere a celulelor eutectice, în cazul grafitului lamelar(*a*), nodular (*b*) și vermicular (*c*) [337].

Mecanismul modificării formei grafitului bazat pe schimbarea vitezelor de creștere în cele două direcții ale rețelei grafitului (*a* și *c*) presupune contactul elementului modificator cu pachetele de grafit din fonta lichidă.

În cazul magneziului, care se găsește în stare gazoasă în fonta lichidă modificată, acest contact se realizează mai ușor. Într-adevăr, dimensiunile bulelor de magneziu sînt mult mai mari față de macromoleculele de carbon sau pachetele ereditare de grafit. Se poate deci considera că elementele nodulizante au mai mult un rol chimic, determinînd „rafinarea" structurilor superficiale ale particulelor grafitice și deci diminuarea conținutului elementelor activ superficiale: oxigenul și sulful.

Datorită schimbării vitezelor de creștere a pachetelor de grafit submicroscopice rezultă germeni cu compactitate variată (pînă la forma nodulară), în funcție de natura fontei lichide și tehnica modificării acesteia.

Așadar, germenii de grafit dobîndesc chiar de la bun început o formă compactă.

Creșterea în continuare a lor se desfășoară fie prin depunerea succesivă pe suprafețele cristaline ale germenilor a straturilor bidimensionale, fie prin depunerea în spirală, cauzată de prezența unor defecte pe suprafața cristalelor.

În afară de teoria adsorbției preferențiale a elementelor modificatoare la suprafața germenilor de grafit și a „rafinării" acesteia, au mai fost propuse și alte ipoteze privind compactizarea grafitului prin modificarea fontei.

Mai cunoscute sînt ipotezele dezagregării pachetelor de grafit, formării germenilor amorfi de grafit, schimbării proprietăților electrice și termice ale germenilor, rolului bulelor de gaze în formarea germenilor de grafit compacți, creșterii subrăcirii etc.

Prin *ipoteza dezagregării pachetelor de grafit* [366] se ține seama de posibilitatea adsorbției elementului modificator, după distrugerea stratului de legătură C-O și C-S, pe suprafața pachetelor de grafit ereditar, cu dimensiuni foarte mici de $10^{-6}...10^{-7}$ cm și pătrunderii în fisurile și porii acestor pachete. Ca urmare, în zonele de penetrare apar tensiuni de adsorbție, care determină accentuarea fisurilor și dezagregarea pachetelor-germeni de grafit și mai multe ramuri, care tind să capete o repartizare tot mai mult radială (fig. 1.32). Fiecare ra-

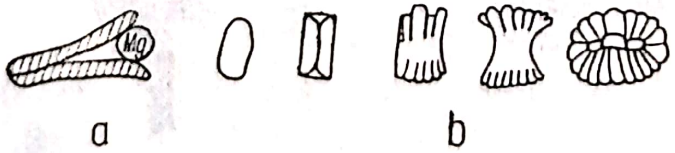


Fig. 1.32. Schema acțiunii modificatorilor asupra formei pachetului de grafit:
a — dezagregarea grafitului; *b* — etapele de compactizare a separării de grafit [366]

Scanned with OKEN Scanner

mură (sector) crește în direcția hexagonului de bază (direcția axei *a*).

Așadar, formarea separărilor compacte de grafit are loc pornind de la pachete (germeni) lamelare.

Elementele antimodificatoare (As, Sb, Sn etc.) acționează asemănător oxigenului și sulfului, formînd legături cu atomii de carbon la suprafața pachetelor de grafit. În contact cu atomii de magneziu, acestea formează compuși stabili și frînează procesul de adsorbție a atomilor acestora și deci efectul lor de dezagregare.

O serie de cercetători [366] susțin că *elementele modificatoare sînt adsorbite la suprafața pachetelor de grafit ereditar*, care reprezintă de fapt frînturi de rețea hexagonală cu atomi de carbon cu legături nesaturate. Cu carbonul, elementele modificatoare formează carburi (de ex. MgC_2, Mg_2C_3, CaC_2, CeC_2, Y_3C, LaC_2 etc.). Aceste carburi sînt instabile și se descompun aproape fără difuzie în anumite microvolume ale fazei lichide, determinînd formarea unor germeni amfori de grafit, caracterizați prin orientarea în diferite direcții a hexagoanelor de bază din rețeaua cristalină. Germenii de grafit amorfi cresc întotdeauna în formă de separări compacte (nodulare). Principalul argument al acestei ipoteze o constituie posibilitatea obținerii grafitului nodular în aliajele Ni-C și Co-C, chiar și fără folosirea tratamentului de modificare, în cazul răcirii lor rapide. La aceste aliaje carburile sînt instabile, se descompun fără difuzie și formează germeni de grafit amorfi.

Obținerea formelor compacte de grafit la o viteză mare de răcire conduce la ipoteza că, la anumite grade de subrăcire, germenii de grafitizare pot crește pînă la separări de maximă compactitate (sferice).

Subrăcirea critică a fontei lichide, necesară pentru creșterea germenilor de grafit sub formă sferică este dată de relația [348]

$$\Delta T = \frac{2\, D^{\circ}\, M\, \sigma_n\, C_{\infty}}{D^{G}\, \delta\, \rho\, R\, T}, \qquad (1.17)$$

în care: D°/D^{G} este raportul coeficienților difuziei atomilor de carbon, în volum și la suprafața grafitului (pe baza prismei 001); M — masa carbonului; δ — grosimea stratului limită; σ_n — tensiunea specifică interfazică; ρ — densitatea grafitului; C_{∞} — concentrația de echilibru a carbonului; R — constanta universală a gazelor.

Luînd în considerare constantele din relația (1.17) și la $C_{\infty}/T =$ $=$ ct, rezultă depedența:

$$\Delta T_e^{critic} = \alpha \frac{D^{\circ} \cdot \sigma_n}{D^{G}}. \qquad (1.18)$$

Raportul D°/D^{G} poate fi scris sub forma:

$$D^{\circ}/D^{G} = exp\left[-\frac{3\, l^2}{2\, K\, T}\, \sigma_p\, (1 - \cos\, 0)\right]. \qquad (1.19)$$

Scanned with OKEN Scanner

Din relațiile (1.18) și (1.19) rezultă:

$$\Delta T_e^{critic} = \alpha \sigma_n \exp\left[\frac{-3 l^2}{2 K T} \cdot \sigma_p \cdot (1-\cos 0)\right], \qquad (1.20)$$

în care: α este constanta globală a relației (1.17); ($\alpha = 1{,}2 \cdot 10^6$ grd. m³/j)
l — distanța interatomică ($l_{Fe} = 2{,}5 \cdot 10^{-10}$ m); σ_p — energia superficială a fontei lichide.

Comparînd rezultatele obținute prin calcul cu cele determinate pe cale practică se ajunge la următoarele concluzii:

a) Grafitul nodular se obține numai în cazul în care $\Delta T_e^{real} > \Delta T_e^{critic}$.

b) Formarea grafitului vermicular este asigurată atunci cînd

$$\Delta T_e^{real} \approx \Delta T_e^{critic}. \qquad (1.21$$

c) Elementele modificatoare (sferoidizante) au rolul de a asigura valori scăzute pentru ΔT_e^{critic}, astfel încît acesta să fie atins

d) Mărimea D°/D^G se poate schimba în procesul de cristalizar în funcție de cinetica distribuției interfazice a elementelor modificatoare și antimodificatoare.

În acest mod, se poate explica posibilitatea realizării formelor compacte de grafit, în urma unor procese de rafinare, supraîncălzire, adaosuri mici de modificatori, la o viteză ridicată de răcire, în aceste condiții asigurîndu-se grade ridicate de subrăcire.

Această teorie este susținută și de faptul că, la viteze mici de răcire, chiar în prezența elementelor modificatoare, în fontă apar separări de grafit lamelar [349]. La grade reduse de subrăcire are loc un proces de creștere a grafitului în regim cinetic, în timp ce la subrăciri mai mari, creșterea are loc în regim de difuzie. Fluxul de difuzie a carbonului variază liniar cu subrăcirea, în timp ce viteza de creștere a separărilor de grafit este proporțională cu pătratul subrăcirii. La ieșirea din domeniul de creștere cinetică a grafitului, din cauza unor subrăciri avansate creșterea separărilor de grafit este limitată de difuzia carbonului, astfel că se obțin forme compacte de grafit [349].

Pentru a ilustra dependența vitezei liniare de creștere a eutecticului (u) de viteza de formare a fazei solide (dv/dr) se utilizează relația [31]:

$$\frac{dv}{dr} = a \cdot p \cdot r^{p-1} \cdot u, \qquad (1.22)$$

$$v = K \cdot \Delta T_G^n, \qquad (1.23)$$

în care: a este o constantă; r — distanța la care crește celula eutectică; ΔT_G — subrăcirea față de temperatura de echilibru.

Scanned with OKEN Scanner

Parametrii p și n capătă următoarele valori:

— Fgl, $p = 2$ și $n = 2$ (creștere cuplată);

— Fgv, $p = 3$ și $n = 3$ (creștere semicuplată);

— Fgn, $p = 3$ și $n = 3$ (creștere separată).

După alți autori modificarea ar consta tocmai din procese de rafinare, coagulare și îndepărtare a incluziunilor, ceea ce determină creșterea gradului de subrăcire (pînă la 30°C), condiție necesară pentru compactizarea grafitului [376].

1.3.3. Mecanismul măririi gradului de grafitizare

Operația de modificare a fontei în vederea creșterii gradului de grafitizare (modificarea grafitizantă) se compune din două etape principale: a) îndepărtarea efectului antigrafitizant provocat de elementele modificatoare care compactizează grafitul și b) creșterea numărului de separări de grafit în vederea obținerii unor proprietăți fizico-mecanice, tehnologice și de exploatare la nivelul prevăzut în normele de recepție.

Modificarea grafitizantă este folosită pe scară largă la producerea fontelor cu grafit nodular. Ea este cunoscută și sub denumirea de *inoculare* și *postmodificare*.

Se cunoaște că elementele modificatoare compactizante în ceea ce privește forma separărilor de grafit, analizate mai înainte (Mg, Ce, Y, EPR etc.), determină creșterea gradului de subrăcire la cristalizarea fontelor și prin aceasta, tendința de albire manifestată prin apariția cementitei libere în structură.

Modificarea grafitizantă este realizată în principal de elementele Si, Al, Sr, Zr, Ba, particule de grafit, FeSi, FeSiCa, precum și modificatorii complecși cu Sr, Zr, Ba etc.

Efectul modificator este cauzat în primul rînd de mărirea germenilor eterogeni și omogeni forțați la cristalizarea eutectică.

Modificarea determină creșterea nivelului de eterogenitate a structurii fontei lichide.

Mecanismul modificării poate fi considerat că se desfășoară după următoarea schemă:

1) Formarea particulelor de SiO_2 datorită reacției dintre silciul din modificator și oxigenul din fonta lichidă; prin dizolvarea granulelor de FeSi în baia de fontă apar microzone mai bogate în siliciu față de concentrația lui medie; în aceste microzone fonta este suprasaturată în siliciu. Reacția $2\,[FeO] + [Si] = (SiO_2) + 2[Fe]$ se desfășoară la temperaturi mai scăzute (sub cea critică de 1400... 1450°C pentru fontele tehnice).

Scanned with OKEN Scanner

Particulele de SiO_2 favorizează germinarea epitaxică a grafitului.

2) Activarea atomilor de carbon în zonele cu concentrații mai mari de siliciu. Activarea poate avea loc ca urmare a micșorării conținutului de oxigen în straturile superficiale ale clasterilor carbonici sau particulelor ereditare de grafit; în acest mod crește saturația fazei lichide în carbon, fluctuațiile atomilor de carbon și deci formarea germenilor omogeni forțați. Elementele modificatoare (Si, Al, Ca, Sr, Ba, Zr etc.) desființează într-o mare măsură clasterii de carbon, adică macromoleculele de tip $\geq C-O-$ și $\geq C-O-C\leq$ caracterizate în general printr-o stabilitate relativ mare.

3) Activizarea atomilor de carbon și deci intensificarea penetrațiilor în carbon datorită creșterii valorii carbonului echivalent al fontei lichide, ținînd seama de faptul că siliciul și aluminiul micșorează solubilitatea carbonului.

4) Creșterea numărului de germeni omogeni de grafit și a fluctuațiilor atomilor de carbon în cazul folosirii modificatorilor cu grafit. Cu alte cuvinte transformarea fontei lichide într-un sistem coloidal cu suprafață de contact dezvoltată între faza solidă și cea lichidă.

5) Formarea de particule oxidice de către celelalte elemente puternic dezoxidante din modificatori (Al, Ca, Ti, Sr, Zr, Ba), de exemplu Al_2O_3 din reacțiile:

$$3\,[FeO] + 2[Al] = (Al_2O_3) + 3[Fe] \qquad (1.24)$$

sau chiar:

$$3\,(SiO_2) + 4\,[Al] = 2(Al_2O_3) + 3\,[Si] \qquad (1.25)$$

6) Formarea de compuși complecși, care pot juca rolul de suporturi pentru germinarea grafitului (de ex., Al_2O_3, — SiO_2 — CaO),

Rezultă că modificarea grafitizantă mărește gradul de neomogenitate a fazei metalice lichide și intensifică mai ales cristalizarea eterogenă.

În fig. 1.33 se arată corelația dintre raza critică a germenilor de grafit și frecvența de formare a lor. Rezultă că la fonta modificată, care cristalizează la subrăciri mai mari, numărul de germeni se obține mai redus, razele lor critice fiind de asemenea mai mici. Modificarea grafitizantă contribuie la intensificarea germinării prin formarea germenilor cu raze mai mari.

În sprijinul mecanismului de modificare menționat se aduc următoarele cinci argumente principale:

1) Puterea dezoxidantă pronunțată a tuturor elementelor modificatoare.

Scanned with OKEN Scanner

2) Diminuarea și chiar dispariția efectului grafitizant la menținerea în stare lichidă a fontei modificate. În aceste condiții, datorită difuziei, dispar microzonele cu suprasaturații în elementele modificatoare și deci cauza fluctuațiilor atomilor de carbon și a formării germenilor eterogeni pentru grafit. În afară de aceasta, are loc și zgurificarea particulelor de SiO_2 (formarea de $FeO \cdot SiO_2$).

3) Micșorarea gradului de subrăcire la cristalizarea eutectică și creșterea intervalului de temperatură dintre cea eutectică stabilă și metastabilă. De exemplu în fig. 1.34 este prezentată influența aluminiului asupra temperaturii eutectice a fontelor [335].

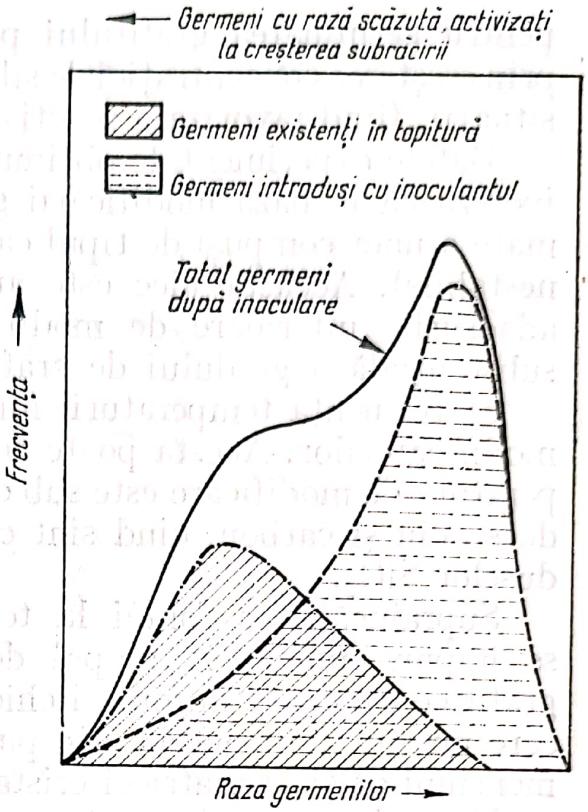


Fig. 1.33. Corelația dintre raza germenilor de grafit și frecvența de apariție a acestora [335].

4) Intensificarea procesului de grafitizare prin creșterea în numeroase microvolume a concentrației de oxigen (de exemplu, prin introducerea unor cantități de 1% burete de fier cu conținuturi de 5% FeO). Cu alte cuvinte, formarea suporților de SiO_2

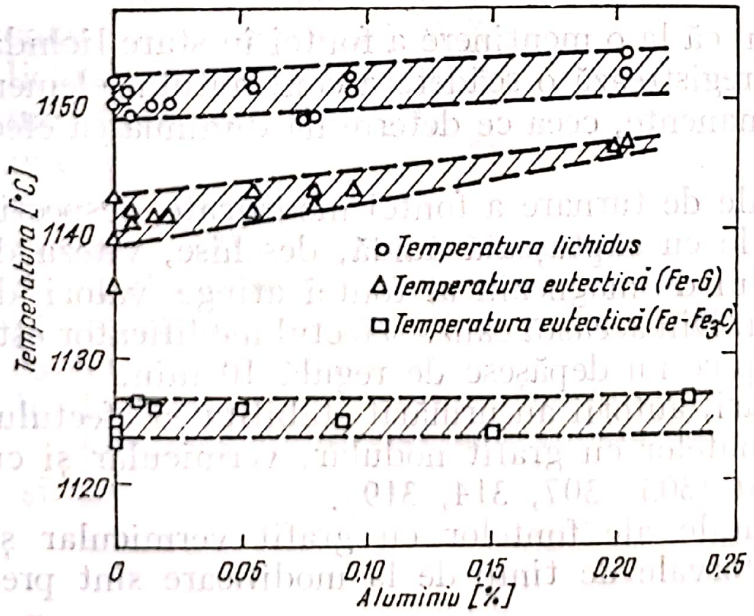


Fig. 1.34. Influența aluminiului asupra temperaturii eutectice la fonte [335].

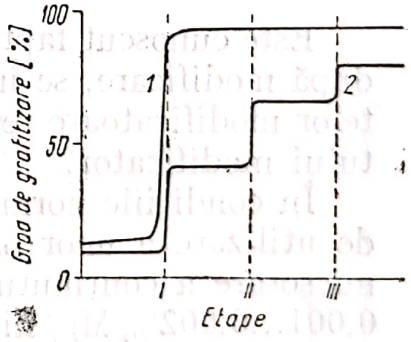


Fig. 1.35. Schema variației gradului de grafitizare la etapele introducerii aceluiași element modificator în fonta lichidă:

1 — variația reală; 2 — variația ipotetică.

Scanned with OKEN Scanner

pentru germinarea grafitului poate fi realizată pe două căi: fie prin creșterea concentrației de siliciu, fie a celei de oxigen în ambele situații, fiind favorizată reacția dintre FeO și siliciu.

Datele experimentale obținute în ultima perioadă nu confirmă ipoteza că la baza modificării grafitizante ar sta procesul de formare a unor compuși de tipul carburilor cu legături ionice (carburi nestabile). Această idee este argumentată mai ales de faptul că adaosurile ulterioare de modificator nu mai provoacă creșterea substanțială a gradului de grafitizare (fig. 1.35).

5) Influența temperaturii fontei asupra efectului grafitizant al modificatorilor. Acesta poate fi obținut numai în cazul cînd temperatura de modificare este sub cea critică a reacției dintre bioxidul de siliciu și carbon, cînd sînt create condițiile de formare a produselor SiO_2.

Supraîncălzirea fontei la temperaturi superioare celei critice se impune numai în scopul dezactivării particulelor oxidice și grafitice existente în fonta lichidă înainte de modificare, particule care nu sînt controlabile din punctul de vedere al numărului, dimensiunilor și al matricei cristaline.

Dezactivarea se bazează pe reacții de reducere ($SiO_2 + 2C \rightarrow 2CO + Si$) și de dizolvare a particulelor ereditare de grafit.

La suprafața particulelor ereditare de grafit sînt adsorbite gaze și elemente superficial active (oxigen, sulf). Din acest motiv stabilitatea lor la menținerea și supraîncălzirea fontei este mare.

1.3.4. Stabilitatea efectului modificator în cazul fontelor cu grafit vermicular

Este cunoscut faptul că la o menținere a fontei în stare lichidă, după modificare, se înregistrează o scădere a conținutului elementelor modificatoare remanente, ceea ce determină diminuarea efectului modificator.

În condițiile normale de turnare a fontei modificate, respectiv de utilizare a unor oale cu căptușeală acidă, deschise, viteza de micșorare a conținutului de magneziu al fontei atinge valori de 0,001...0,002% Mg/min. Din această cauză, efectul modificator este stabil perioade de timp ce nu depășesc de regulă 10 min.

Într-o serie de lucrări, autorii au urmărit stabilitatea efectului modificator în cazul fontelor cu grafit nodular, vermicular și cu grafit lamelar modificat [305—307, 314, 319].

Schimbările structurale ale fontelor cu grafit vermicular și nodular, la diferite intervale de timp de la modificare sînt prezentate în fig. 1.36.

Structura ferito-perlitică a fontelor suferă transformări în sensul creșterii cantității de ferită, la ambele tipuri de fonte.

Scanned with OKEN Scanner

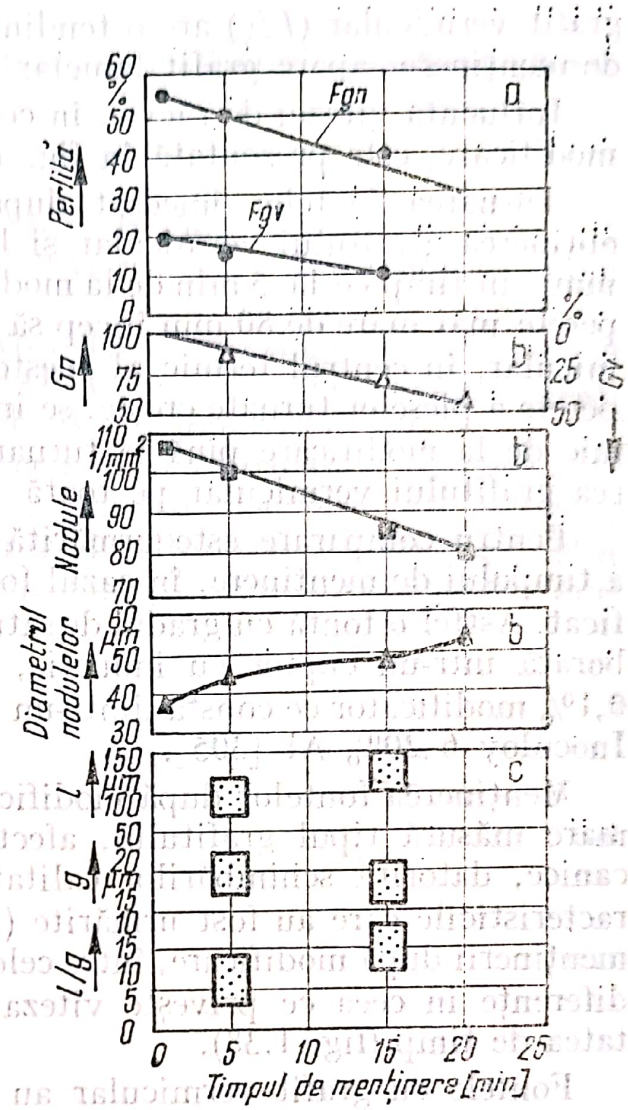


Fig. 1.36. Influența timpului de menținere de la modificare pînă la turnare asupra cantității de perlită (*a*) și asupra grafitului nodular (*b*) și vermicular (*c*) [307].

În ceea ce privește grafitul, în tot intervalul de turnare studiat, cele două tipuri de grafit rămîn practic prezente în fonte, suferind însă transformări calitative.

În cazul fontei cu grafit nodular, menținerea în stare lichidă după modificare a determinat apariția grafitului vermicular alături de cel nodular, precum și micșorarea numărului de nodule de grafit pe unitatea de suprafață. Se înregistrează o creștere a dimensiunilor nodulelor de grafit, concomitent cu pierderea gradului de compactitate.

La fonta cu grafit vermicular, menținerea în stare lichidă timp de 15 min după modificare nu a schimbat practic tipul grafitului. Se remarcă însă o micșorare a gradului de compactitate, dar grafitul vermicular își păstrează în tot acest timp caracteristicile dimensionale de bază.

Raportul între lungimea și grosimea separărilor de

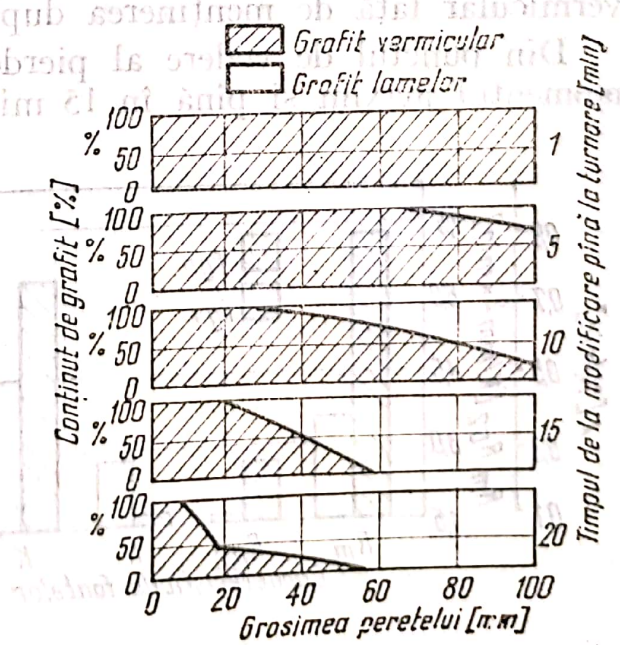


Fig. 1.37. Influența grosimii de perete și a timpului de la modificare asupra grafitului în fontele cu grafit vermicular [306, 307].

grafit vermicular (L/g) are o tendință de mărire, iar după 20 min de menținere, apare grafit lamelar.

Influența vitezei de răcire, în condițiile menținerii fontei după modificare, este prezentată în fig. 1.37.

Turnarea fontelor imediat după modificare (1 min) asigură obținerea grafitului vermicular și la grosimi mari de perete (100 mm), în timp ce la 5 min de la modificare în piesele cu grosimea de perete mai mare de 80 mm încep să apară și separări de grafit vermicular, în centrul termic al acestora. Pe măsură ce grosimea de perete a pieselor turnate crește, se impune un interval de timp mai mic de la modificare pînă la turnare pentru a se asigura obținerea grafitului vermicular pe toată secțiunea peretelui piesei.

Pentru comparare este urmărită influența vitezei de răcire și a timpului de menținere, în cazul fontelor cu grafit lamelar modificat. Astfel o fontă cu gradul de saturație în carbon $S_c = 0{,}88$ elaborată într-un cuptor cu inducție, a fost modificată în oală cu 0,1% modificator ce constă dintr-un amestec din 40% FeSi 75,40% Inoculoy 6 ,20% Al [305].

Menținerea fontelor după modificare, chiar dacă nu schimbă în mare măsură tipul grafitului, afectează totuși proprietățile mecanice, datorită schimbărilor calitative ale grafitului. Toate caracteristicile care au fost urmărite (R_m, $R_{0,2}$, A, K), scad datorită menținerii după modificare, între cele două tipuri de fonte, apărînd diferențe în ceea ce privește viteza cu care acestea scad în unitatea de timp (fig. 1.38).

Fontele cu grafit vermicular au o stabilitate structurală mai mare decît cele cu grafit nodular, astfel încît și proprietățile mecanice prezintă o scădere relativă mai mică. Doar în cazul alungirii a fost constatată o sensibilitate mai mare a fontei cu grafit vermicular față de menținerea după modificare.

Din punctul de vedere al pierderii efectului modificator din momentul maxim și pînă în 15 min de la modificare, exprimat

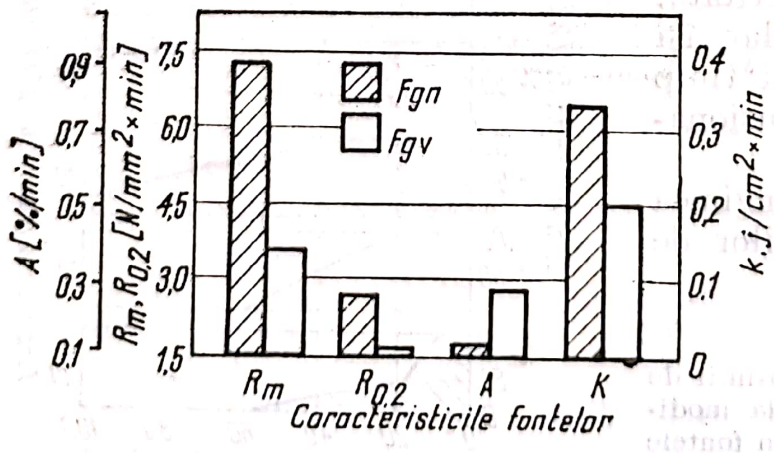


Fig. 1.38. Viteza de scădere a valorilor caracteristicilor mecanice ale fontelor, după modificare [306, 307].

prin scăderea rezistenței la tracțiune (N/mm². min) se obține relația:

$$Fgn : Fglm : Fgv = 1{,}825 : 1{,}5 : 1. \qquad (1.26)$$

Perioade de menținere de max. 10 min sînt recomandate, în cazul obținerii fontelor cu grafit vermicular, prin modificarea cu magneziu [185].

În cazul modificării cu ceriu, durata maximă de menținere a fontei cu grafit vermicular, la 1420°C, în oale cu căptușeală acidă, se recomandă să nu depășească 10—12 min [253, 353].

Urmărind influența menținerii asupra structurii fontelor modificate cu elemente din grupa pămînturilor rare, s-a remarcat faptul că în acest timp tendința de albire crește, iar conținutul de sulf al fontei influențează în mare măsură compactitatea grafitului [219].

Scanned with OKEN Scanner

2. MODIFICAREA FONTELOR ÎN VEDEREA OBȚINERII GRAFITULUI VERMICULAR

2.1. Posibilități de obținere a grafitului vermicular

Preocupările în direcția obținerii fontelor cu forme intermediare de grafit permit conturarea unor direcții principale de acțiune (fig. 2.1):

a) Desulfurarea avansată a fontelor ($S < 0{,}002\%$) și solidificarea cu o viteză de răcire ridicată (turnare în forme metalice sau de grafit). Același tip de grafit (coral) se obține și în cazul turnării în forme din amestec de formare, dar cu adaosuri suplimentare de elemente (de exemplu, zirconiu).

b) Modificarea fontelor cu magneziu, utilizîndu-se în acest scop fie conținuturi mici de magneziu rezidual (0,01—0,03% Mg), fie combinații ale acestuia cu elemente antimodificatoare (Al, Ti).

c) Modificarea cu ceriu, singur sau în combinație cu magneziul, eventual în prezența unor elemente antimodificatoare (Al, Ti).

d) Modificarea cu Ytriu, eventual împreună cu elementele din grupa pămînturilor rare.

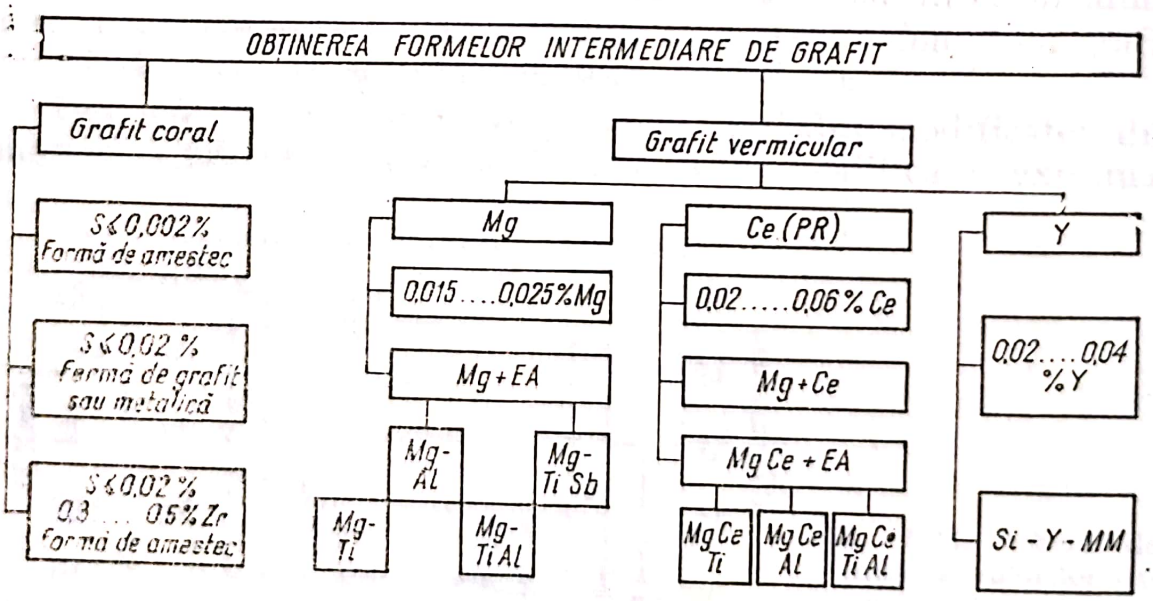


Fig. 2.1. Variante de obținere a fontelor cu forme intermediare de grafit (EA — elemente antimodificatoare).

Scanned with OKEN Scanner

Elementele active sînt introduse în fonta lichidă în stare liberă sau înglobate în modificatori complecși, utilizîndu-se în acest scop tehnici variate: modificarea în oală, în jet, în bazinul rețelei de turnare și în formă, etc.

2.2. Obținerea formelor intermediare de grafit în fontele cu conținut scăzut de sulf

Formele intermediare de grafit, tip „coral" pot fi obținute în fontele cu un conținut scăzut de sulf (sub 0,002%) și la o viteză de răcire ridicată (turnare în forme de grafit).

Aceleași forme de grafit se obțin și în cazul turnării în forme din amestec de formare a unor probe cu diametrul de 50 mm, la un adaos de 0,3% Zr [52].

Sulful afectează în mare măsură propretățile mecanice ale fontelor (fig. 2.2, *a*)

Creșterea conținutului de sulf al fontei determină mărirea dimensiunilor separărilor de grafit, realizîndu-se o trecere de la grafitul „coral" spre cel lamelar, ceea ce determină o micșorare a rezistenței [52, 403]. O influență analoagă are creșterea grosimii de perete a probelor turnate (fig. 2.2, *b*)

La un conținut de sulf de max. 0,003%, în piesele cu pereți subțiri (6,5 mm) apare grafitul tip coral, care asigură proprietăți mecanice ridicate: $R_m = 450—500$ N/mm²; $R_{0,2} = 350$ N/mm²; $A = 3\%$ și 190 *HB*. Creșterea grosimii de perete la 50 mm conduce la scăderea rezistenței la tracțiune la 350 N/mm² și duritatea la 150 *HB* [239].

Fontele turnate în forme din amestec conțin grafit lamelar. Doar în cazul unor probe ∅12 mm apar zone izolate cu grafit coral.

Adaosuri de zirconiu la un conținut scăzut de sulf ($\leqslant 0,02\%$) determină apariția a peste 80% grafit coral în probele ∅ 25 mm, în forme din amestec (fig. 2.3). Rezistența la tracțiune a acestor fonte este inferioară celei realizate în cazul turnării în forme de grafit, dar totuși superioară fontelor cu grafit lamelar. Se recomandă 0,3...0,5% Zr și grosimi de perete care să nu depășească, 25 mm, la turnarea fontelor în amestec de formare. La turnarea în forme de grafit, adaosul de zirconiu permite creșterea grosimii de perete a pieselor turnate. Fonte cu grafit coral au fost obținute de către BCIRA (Anglia) prin topirea în cuptoare electrice a unei ncărcături sărace în sulf, urmată de o desulfurare cu 2% CaC_2 în a lă cu dop poros. După desulfurare, fonta este reîncălzită, inocu-

Scanned with OKEN Scanner

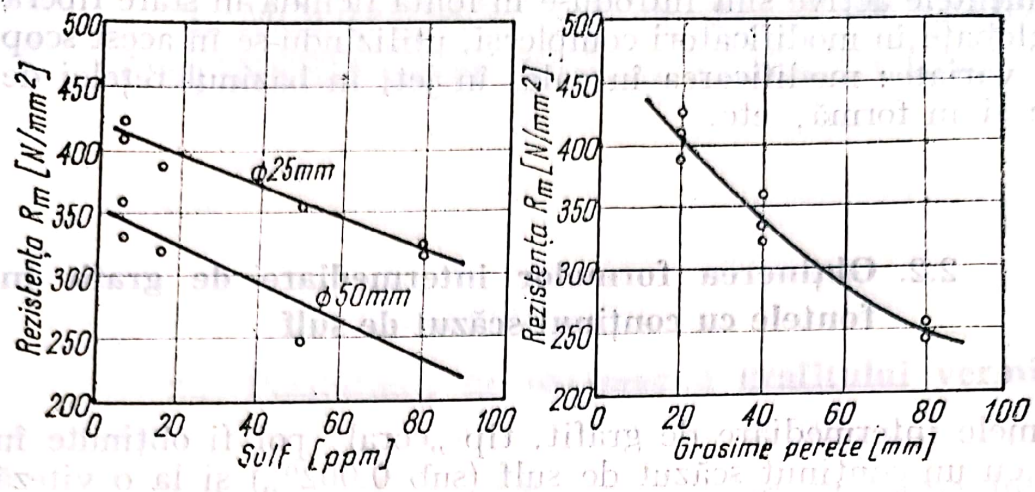


Fig. 2.2. Dependența rezistenței la tracțiune de conținutul de sulf al fontei (*a*) și de grosimea de perete (*b*) [52, 54].

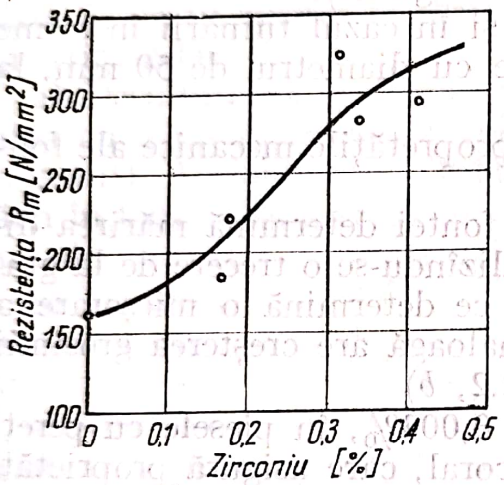


Fig. 2.3. Influența zirconiului asupra rezistenței fontelor cu ⩽0,02% S (probe ∅ 25 mm) [52, 54].

lată cu ferosiliciu și apoi turnată în forme metalice sau din grafit [450].

Utilizînd mai multe elemente cu acțiune dezoxidantă, în vederea obținerii grafitului tip coral: 0,1...0,5% Ti, 0,005—0,075% Ce, 0,01...0,15% (Mg+PR), 0,1...1,0% Al și 0,10...0,50% Zr, s-a constatat că cele mai bune rezultate se obțin la un adaos de 0,4% Zr, respectiv peste 80% grafit coral în probele ∅ 25 mm și peste 60% în probele ∅ 50 mm. La turnarea în forme de grafit, un adaos de 0,2% Zr asigură obținerea grafitului coral, în proporție de 100%, la toate grosimile de perete (25...100 mm) [52]. Zirconiul asigură obținerea grafitului coral și la viteze mici de răcire, atît datorită acțiunii sale dezoxidante, cît și datorită gradului de subrăcire, respectiv a vitezei de creștere a celulelor eutectice. Acțiunea perlitizantă a cuprului și staniului este scăzută în fontele cu grafit coral, datorită distanțelor foarte mici între ramurile grafitului, care favorizează difuzia carbonului. Ambele elemente determină formarea grafitului lamelar în locul celui tip coral [54].

Scanned with OKEN Scanner

Siliciul, peste valorile necesare obținerii unei structuri feritice, contribuie la mărirea rezistenței la tracțiune (tabelul 2.1) [52]. Influența siliciului asupra proprietăților mecanice ale fontelor cu grafit tip coral este prezentată în fig. 2.4 [52, 54].

Tabelul 2.1

INFLUENȚA SILICIULUI ASUPRA PROPRIETĂȚILOR FONTELOR CU GRAFIT „CORAL" [52]

Forma de turnare	Compoziția chimică, %				Perlită %	Duritate HB	Alungire A, %	Rezistență R_m, N/mm²
	C	Si	S	Zr				
De amestec de formare	3,20	3,56	0,018	0,35	5	179	1,0	414
	3,15	3,72	0,017	0,37	5	185	0	345
	3,35	3,10	0,017	0,33	5	156	1,0	328
	3,42	2,25	0,011	0,34	20	170	0,5	286
	3,35	3,34	0,013	0,34	5	163	1,0	328
	3,37	4,0	0,006	0,38	5	189	1,5	370
	3,35	2,75	0,011	0,36	5	155	0	309
De grafit	3,15	3,89	0,016	0,01	5	ND	1,0	437
	3,22	3,90	0,014	0,01	5	ND	1,5	530

La durități egale, fontele cu grafit coral sînt caracterizate de o rezistență la tracțiune superioară fontelor cu grafit lamelar. În fontele cu sulf foarte scăzut, mici adaosuri de ceriu asigură obținerea grafitului vermicular (100% Gv). Rezultate analoage se

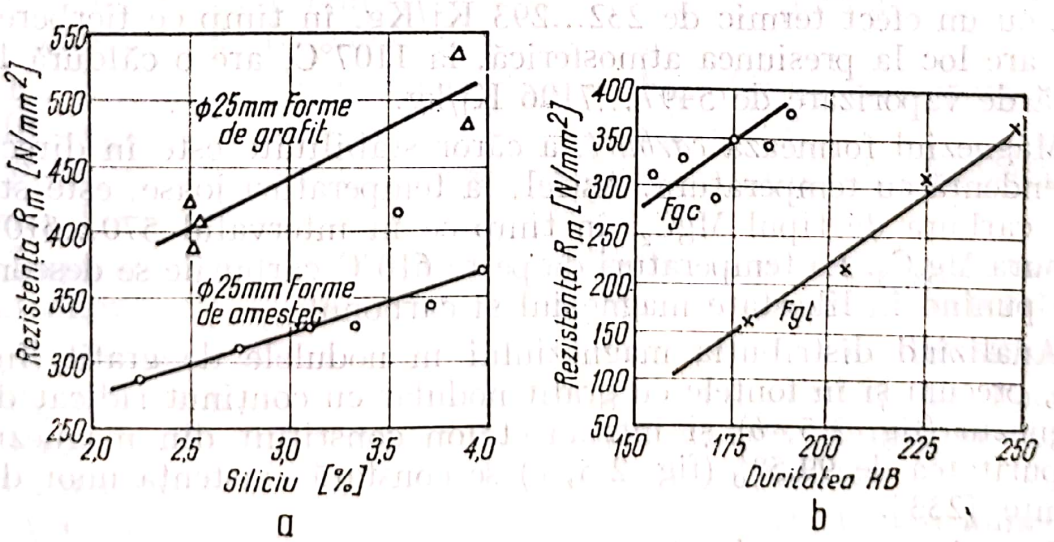


Fig. 2.4. Dependența rezistenței la tracțiune de conținutul de siliciu (*a*) și duritatea fontei (*b*):
Fgc — fontă cu grafit coral; Fgl — fontă cu grafit lamelar [52,54].

Scanned with OKEN Scanner

obțin și în cazul utilizării unor amestecuri formate din magneziu și pămînturi rare.

Proprietățile mecanice ale acestor fonte sînt ridicate, similare celor ale fontelor cu grafit tip coral, la turnarea în forme permanente. Totuși, fontele cu sulf scăzut, cu grafit vermicular, prezintă unele avantaje în comparație cu cele cu grafit coral. Formarea grafitului vermicular este puțin dependentă față de viteza de răcire, astfel că proprietățile mecanice sînt puțin influențate de grosimea de perete.

Costul unor adaosuri de 0,02% Ce în fontele cu sulf sub 0,002% este mai scăzut decît cel al zirconiului, folosit în proporție de 0,5%. Totuși, la turnarea în forme metalice sau de grafit, fontele cu grafit tip coral sînt mai ieftine (nu mai necesită adaosuri). Fontele cu grafit tip coral au o tendință mică de albire și de formare a retasurii, precum și o prelucrabilitate bună.

Fontele cu sulf scăzut, cu grafit vermicular sau coral, sînt mai ieftine decît cele cu grafit nodular [52].

2.3. Utilizarea magneziului la modificarea fontelor

2.3.1. Interacțiuni ale magneziului

Magneziul, cu o densitate scăzută (1,7 kg/dm³) cristalizează în sistemul hexagonal compact, parametrii rețelei fiind $a = 3{,}202$ A° și $c = 5{,}199$ A°, iar distanța interatomică 3,2 A°.

Trecerea magneziului în stare lichidă ($T_t = 650$°C) este realizată cu un efect termic de 232...293 Kj/Kg, în timp ce fierberea, care are loc la presiunea atmosferică, la 1107°C, are o căldură latentă de vaporizare de 5497...7106 Kj/kg.

Magneziul formează *carburi*, a căror stabilitate este în directă dependență cu temperatura. Astfel, la temperaturi joase, este stabilă carbura de tipul MgC_2, în timp ce în intervalul 570...610°C carbura Mg_2C_3. La temperaturi de peste 610°C carburile se descompun punînd în libertate magneziul și carbonul.

Analizînd distribuția magneziului în nodulele de grafit (fig. 2.5), precum și în fontele cu grafit nodular cu conținut ridicat de magneziu (fig. 2.5, *b*) și într-un etalon constituit din magneziu cu puritatea de 99,5% (fig. 2.5, *c*) se constată existența unor diferențe [233].

Dacă în ceea ce privește distribuția magneziului în etalon abaterile sînt minime ($\approx 1\%$), se constată că acest element se concentrează în carburile de magneziu de tipul $Mg_x\ Mg_y\ C_z$ și în nodulele

de grafit. În ceea ce privește magneziul localizat în grafit, intensitatea $MgK_{\beta 1}$ crește rapid, în raport cu $MgK\alpha_{1,2}$.

Pentru Al, Si, Ca reacțiile de formare a carburilor sînt posibile din punct de vedere termodinamic, dar produsele, respectiv SiC, Al_4C_3, CaC_2, sînt instabile. Se apreciază însă că reacțiile de formare a carburilor de magneziu, Mg_2C_3 și MgC_2, nu sînt posibile termodinamic (fig. 2.6) [419]. Determinarea practică a acestor carburi în structura fontei dovedește însă posibilitatea formării lor.

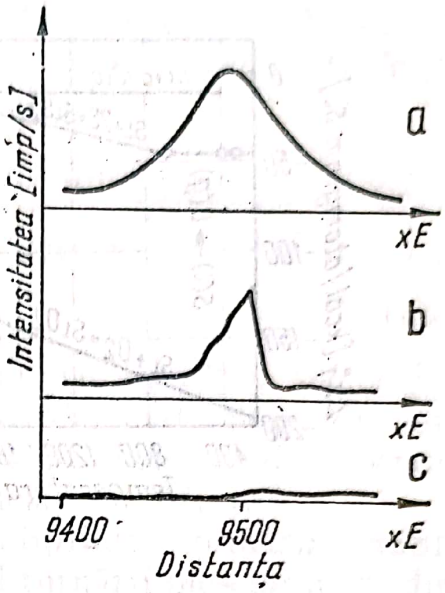


Fig. 2.5. Distribuția magneziului în nodulele de grafit (*a*), carburile de magneziu (*b*) din fontele cu grafit nodular și în magneziul cu puritatea 99,5% (*c*) [233].

Prezența carburii de magneziu, Mg_2C_3, în separările de grafit in fontele modificate a fost pusă în evidență în mai multe lucrări [87, 234, 338].

O mare cantitate de carburi MgC_2 și Mg_2C_3 a fost constatată în fontele cu conținut ridicat de magneziu (0,21...0,28% Mg), în timp ce la conținuturi mai scăzute (0,066% Mg) cantitatea de carburi este mai mică [87].

În cazul fontelor cu 0,066...0,31% Mg, au fost constatate carburi de magneziu și magneziu metalic, în timp ce la valori sub 0,066% Mg, erau prezente numai carburi de magneziu. La conținuturi de magneziu remanent de peste 0,07%, prezența carburilor de magneziu este frecventă [234].

La conținuturi ridicate de magneziu, alături de separări de grafit degenerat au fost semnalate și carburi [30].

Prezența magneziului metalic în fonta solidificată este pusă pe seama descompunerii carburilor [287].

Împreună cu *siliciul*, prezent în fontă și în majoritatea modificatorilor se formează combinații de tipul Mg_2Si, cu o temperatură de topire de 1102°C, superioară celei a eutecticelor din sistemul Si Mg (638 și 950°C) precum și a magneziului pur (650°C). Forțele de legătură din combinațiile Mg_2Si sînt scăzute, permițînd evaporarea magneziului din prealiajele pe bază de siliciu.

Activitatea scăzută a siliciului poate fi cauza legării numai a unei părți a magneziului în modificatori, cealaltă parte trecînd sub formă de vapori, provocînd porozitatea prealiajului. Rezultă deci că micșorarea conținutului de siliciu din modificator mărește

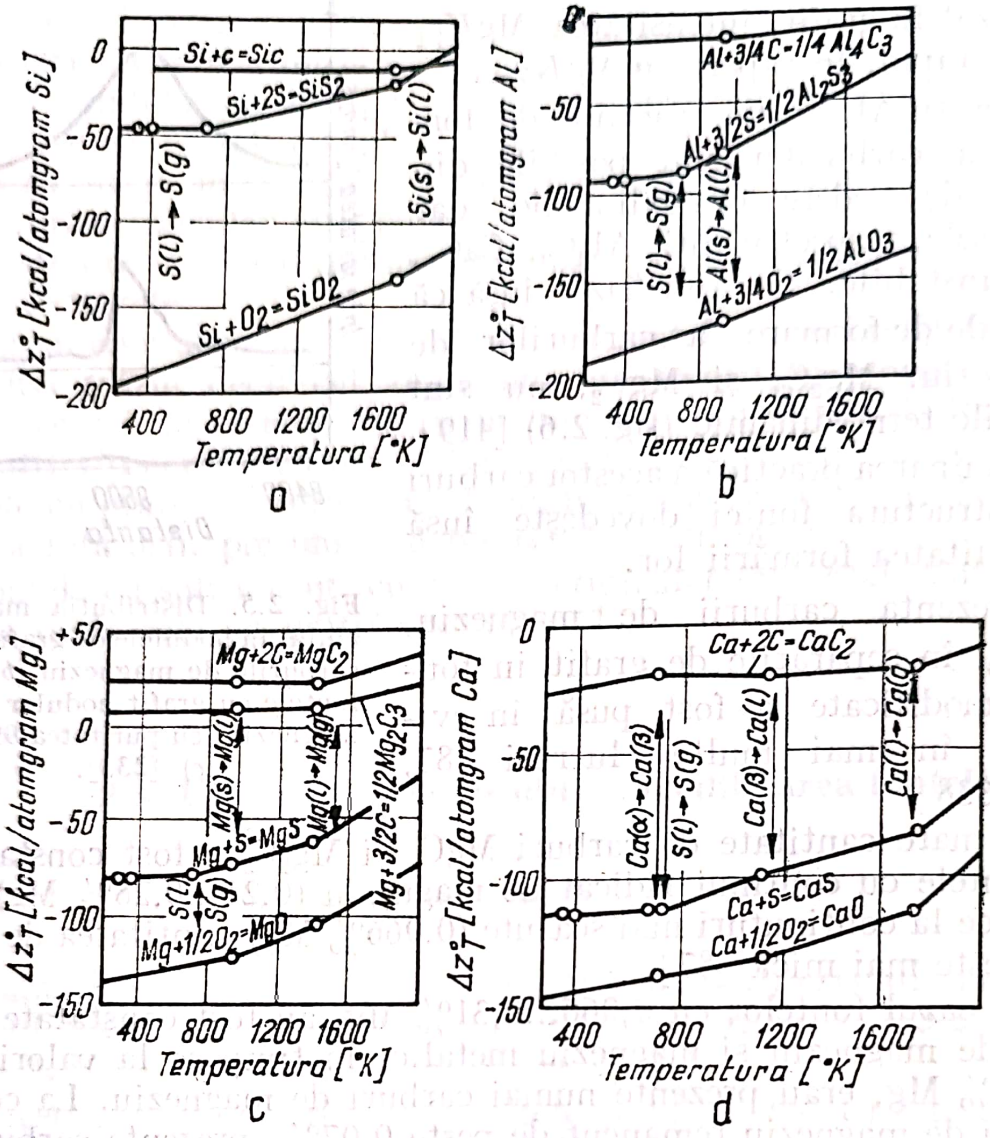


Fig. 2.6. Potențialele izobare ale reacțiilor cu oxigenul, sulful și carbonul pentru siliciu (*a*), aluminiu (*b*), magneziu (*c*) și calciu (*d*) [419].

porozitatea acestuia, concomitent cu micșorarea cantității de magneziu legat în modificator.

La temperaturi de peste 1350°C, combinația Mg_2Si se oxidează și se formează MgO și Si [21]. În cazul utilizării modificatorilor pe bază de siliciu, se obține în primul rînd MgO și în mai mică măsură, SiO_2. Din pierderile de magneziu la modificare, doar circa 10% sînt reținute în zgură restul trecînd în atmosferă.

În cazul unor piese din fontă cu grafit nodular, turnate în forme — coji, a fost constatată prezența unui strat de grafit lamelar (0,2—0,8 mm) la suprafața pieselor, pus pe seama oxidării magneziului, respectiv a apariției reacției [118]:

$$SiO_2 + 2Mg = Si + 2MgO$$

Scanned with OKEN Scanner

La tratarea fontelor cu magneziu se formează o zgură din sistemul Mg-Si-O, ce conține: MgO, SiO_2, Mg_2SiO_4, Mg_2SiO_2, MgS, Al_2O_3, Fe_2SiO_4, Fe. Zgura conține peste 50% ($MgO + SiO_2 + Mg_2SiO_4$) [21].

Magneziul interacționează în fontă cu siliciul, după reacțiile:

$$2Mg + SiO_2 = Si + 2MgO \quad (2.1)$$

$$2Mg + Si = Mg_2Si \quad (2.2)$$

Bioxidul de siliciu poate fi redus numai de către magneziul lichid sau de cel dizolvat. În general, pierderile de magneziu sînt mai mari în cazul utilizării oalelor cu căptușeală acidă, tocmai datorită participației la oxidarea magneziului [21, 158].

Avînd în vedere faptul că există posibilitatea formării combinațiilor între siliciu și magneziu, în cazul turnării pieselor mari din fontă cu grafit nodular (lingotiere) se recomandă ca odată cu mărirea conținutului de siliciu să crească și cantitatea de magneziu: pentru 1,7...2,0% Si este suficient 0,03...0,04% Mg_{rem}, în timp ce la 2,4...2,7% Si se recomandă 0,07% Mg [418].

Calciul, prezent de regulă în compoziția modificatorilor, formează compuși atît cu siliciul cît și cu magneziul.

Combinațiile de tipul CaSi sînt deosebit de rezistente, mai puternice decît cele de tipul FeSi și Mg_2Si.

Combinația magneziului cu calciul (Mg_2Ca) apare numai sub 714°C.

Rezultă deci că introducerea calciului în modificatorii pe bază de siliciu favorizează formarea combinațiilor de tipul CaSi și micșorarea legăturii magneziului cu siliciul, ceea ce determină o asimilare mai scăzută a elementului modificator.

A fost constatat faptul că la modificatorii cu 40...55% Si și 8...20% Ca, asimilarea unor cantități de peste 10% Mg se realizează cu pierderi masive prin evaporare, în timp ce la conținuturi mai mici de magneziu (sub 10%), evaporarea acestuia are loc într-o mai mică măsură.

La conținuturi mai mici de calciu (sub 4%), se realizează forțe mari de legare a magneziului în modificator, micșorîndu-se în acest mod viteza de evaporare a acestuia atît la fabricarea modificatorului cît și la utilizare.

În sistemul Ni-Mg se formează compuși de tipul $MgNi_2$, eutectice ($MgNi_2 + Ni$) precum și magneziu liber. Prezența magneziului liber și a combinațiilor instabile $MgNi_2$ determină o evaporare a magneziului din acești modificatori. Legarea magneziului în modificatorii pe bază de nichel este favorizată de prezența siliciului.

Magneziul este un element cu *acțiune desulfurantă* puternică chiar la temperaturi ridicate (fig. 2.6, *c* și fig. 2.7).

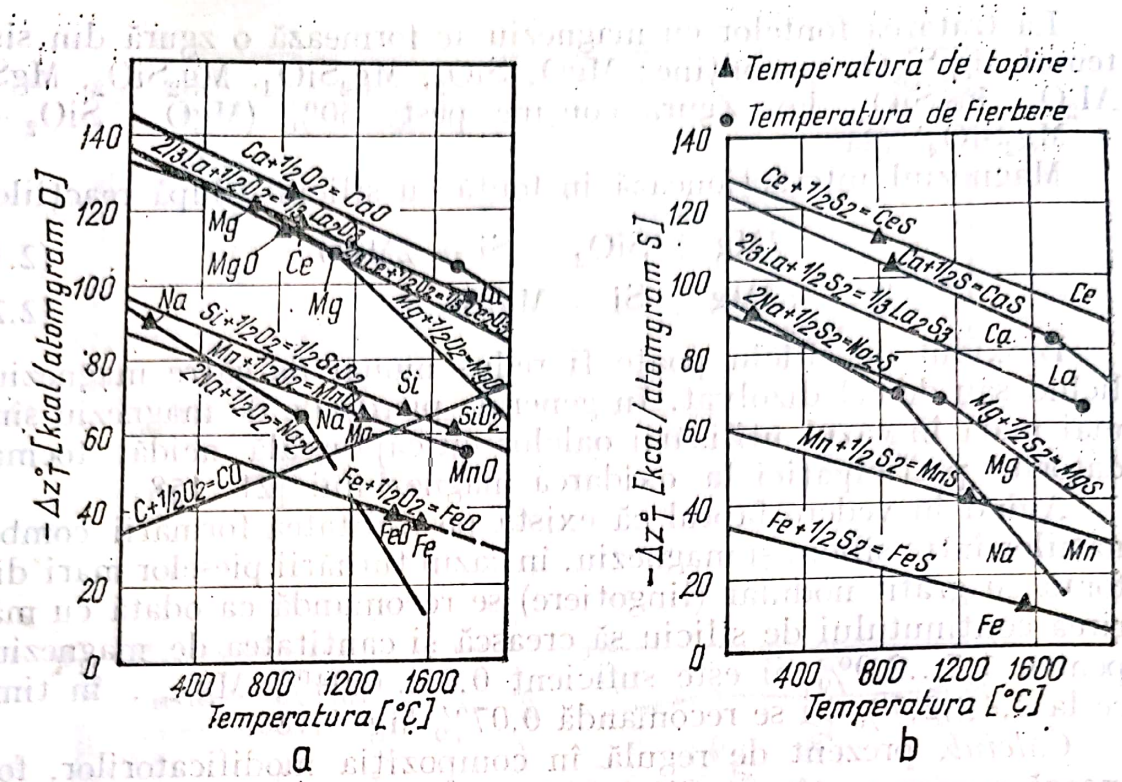


Fig. 2.7. Capacitatea dezoxidantă (*a*) și desulfurantă (*b*) a magneziului, în comparație cu alte elemente [245].

În urma tratării cu magneziu, conținutul de sulf al fontei scade în mare măsură, datorită reacției:

$$[FeS]_l + \{Mg\}_g = (MgS)_s + [Fe]l \qquad (2.3)$$

Analiza structurală a condus la semnalarea prezenței separărilor de MgS, cu dimensiunile de 1—2 μm, între nodulele de grafit. Sulful reacționează în primul rînd cu picăturile de magneziu, cu formarea de MgS de dimensiuni mici. Picăturile de magneziu au o suprafață foarte mare (peste 7000 mm², picături/1g Mg), astfel că reacția cu sulful este deosebit de intensă [385]. La o viteză de răcire ridicată contactul Mg-S este scăzut, astfel că reacția între cele două elemente are loc în mică măsură.

În cazul modificării fontei cu magneziu sub formă de pulbere într-un amestec (Mg + grafit), în proporție 3 : 1, introdus în fontă cu ajutorul aerului comprimat, principalii factori care determină valoarea magneziului remanent sînt cantitatea de magneziu introdus și valoarea sulfului în momentul modificării [265], respectiv

$$Mg_{rem} = 0{,}038 + 0{,}02\ [Mg]_{intr} - 0{,}493\ [S]_{inițial}. \qquad (2.4)$$

Cantitatea de magneziu ce acționează efectiv în fontă poate fi pusă în dependență directă cu conținutul de sulf [158], conform relației:

$$Mg_{efectiv} = [\%\ Mg]_{introdus} - (3/4)\ [\%\ S]_{inițial}. \qquad (2.5)$$

Magneziul are o afinitate ridicată față de *oxigen*, manifestînd o capacitate dezoxidantă superioară altor elemente (fig. 2.7, *b*) [245].

Formarea oxizilor de magneziu în fontele modificate este posibilă din punct de vedere termodinamic (fig. 2.6) [419].

Din interacțiunea magneziului cu *azotul* rezultă Mg_3N_2, ușor de descompus, în timp ce cu *hidrogenul* se formează MgH_2, stabilă numai la temperaturi scăzute (sub 280°C).

În urma interacțiunilor pe care magneziul le are cu elementele din compoziția fontei și zgurii, din căptușeală și atmosferă rezultă o zgură din sistemul Mg-Si-O-S, reținută în mare măsură de către fonta în curs de solidificare. Această zgură conduce la formarea *„petelor negre"*, frecvent întîlnite la fontele cu grafit nodular, apariția lor fiind posibilă însă și la fontele cu grafit vermicular.

Zgura formată în urma procesului de modificare cu magneziu introdus în fontă sub forma unor modificatori pe bază de siliciu conține: MgO, SiO_2, Mg_2SiO_4 (forsterită), $MgSiO_3$ (enstatită), MgS, Al_2O_3, Fe_2SiO_4, Fe [21].

În tabelul 2.2 sînt prezentați principalii factori care influențează cantitatea și compoziția zgurei formate în urma modificării [21].

Tabelul 2.2

INFLUENȚA TEHNOLOGIEI DE MODIFICARE ASUPRA ZGUREI FORMATE [21]

Parametrul tehnologic	Influența creșterii parametrului tehnologic asupra:		
	Cantitatea totală de zgură	Mg_2SiO_4 %	MgO %
Timpul de menținere	+	+	—
Temperatura de menținere	—	—	max.
Temperatura de modificare	max.	min.	—
p_{O_2} în atmosferă	ND	+	—
Sulf în fontă	+	—	—
Magneziu introdus în fontă	+	+	ND
Ceriu introdus în fontă	+	—	—
Siliciu în fontă	—	+	+
Siliciu în modificator	+	+	ND
Siliciu introdus cu modificatorul	+	+	+

Semnificația notațiilor. [(+) — creștere; (—) — micșorare; (ND) — nedeterminat; (max.) — este maximă; (min.) — este minimă.

Scanned with OKEN Scanner

Se remarcă faptul că mărirea cantității de magneziu introdus în fontă determină o creștere a cantității de zgură. Creșterea conținutului de siliciu din fontă, în special pe seama celui adus de modificator contribuie în mare măsură la rebutarea pieselor datorită particulelor de zgură.

Autorii [402] nu au constatat interacțiuni ale fontei modificate cu căptușeala oalei și materialul formei.

Turnarea fontelor modificate în forme pe bază de rășini furanice face posibilă interacțiunea chimică între magneziu și mangan, pe de o parte și sulful din gazele provenite din formă, pe de altă parte [405]. Datorită fixării magneziului sub formă de MgS, este posibilă formarea unor separări de grafit degenerat la suprafața pieselor, concomitent cu apariția „petelor negre".

Prezența ceriului în compoziția modificatorilor determină nu numai o micșorare a pierderilor de magneziu, dar și o scădere a cantității de MgO și SiO_2 formate, datorită afinității sale față de oxigen mai mare decît cea a magneziului și siliciului.

Menținerea un timp mai îndelungat a fontei după modificare ca și turnarea cu o viteză mai scăzută determină oxidarea magneziului și deci formarea de MgO. Menținerea și turnarea fontei sub temperatura de 1426°C conduce la formarea de SiO_2 și respectiv Mg_2SiO_4.

Adaosul în oală a unor fluxuri de tipul clorurilor și fluorurilor contribuie la micșorarea temperaturii de topire a zgurei și deci la posibilitatea scăderii temperaturii de turnare. Analiza zgurei după adăugarea criolitului în oala cu fontă modificată a scos în evidență faptul că zgura nu mai conține MgO și Mg_2SiO_4. Cea mai eficace s-a dovedit a fi tratarea cu fluoruri de sodiu [21].

Prin adăugarea la suprafața fontei din oală a unor fluoruri (BaF_2, CaF_2, MgF_2) durabilitatea efectului modificator crește, înregistrîndu-se pierderi mai mici de magneziu [47].

Micșorarea conținutului de magneziu în timpul menținerii după modificare a fost constatată și în cazul unor căptușeli bazice (magnezită) sau neutre (corindon). Se remarcă totuși faptul că la o căptușeală bazică, pierderile de magneziu sînt mai scăzute [181]. Și în aceste cazuri, utilizarea unor fluxuri de protecție ($BaCl_2$, CaF_2, $MgCl_2$) conduce la micșorarea pierderilor de magneziu.

În cazul unor cuptoare cu inducție cu capacitatea de 750 kg cu căptușeală din cromomagnezită, fonta modificată cu magneziu a fost menținută 15—30 min, la temperatura de 1450°C, fără să se piardă efectul modificator. Acoperirea fontei cu o crustă ceramică topită la contactul cu topitura, a permis extinderea duratei de menținere la 90 min [26].

În cadrul firmei ASEA, în cuptoarele cu inducție cu canal, cu căptușeală neutră (Al_2O_3), de 3,0 t, fonta modificată cu magneziu

Scanned with OKEN Scanner

a fost menținută la 1400°C timp de 100 min, fără ca ponderea grafitului nodular să scadă sub 80% [26].

Pierderile maxime de magneziu se înregistrează în prima parte a perioadei de menținere, datorită atît evaporării cît și formării unor combinații ale magneziului.

2.3.2. Modificarea fontelor cu cantități mici de magneziu

2.3.2.1. *Tratarea fontelor cu magneziu scăzut*

Utilizarea unor cantități reduse de magneziu pentru modificarea fontelor determină schimbări limitate în ceea ce privește forma grafitului, ajungîndu-se doar pînă la forme intermediare de grafit, respectiv grafitul vermicular.

Astfel, plecînd de la fonte din domeniul eutectic (*CE* max. 4,4%), cu sulf scăzut (max. 0,015%), modificarea cu magneziu a condus la obținerea grafitului vermicular, la valori ale magneziului remanent de 0,01...0,025% [5].

Se pot produce fonte cu grafit vermicular elaborate în cubilou și modificate cu magneziu [185]. Sînt utilizate cubilouri cu aer rece îmbogățit în oxigen, cu o capacitate de 100 t/zi. Încărcătura cubilourilor constă în 20% fontă veche (Mn scăzut), 45% deșeuri proprii și 35% deșeuri de oțel, astfel că fonta elaborată conține 3,5...3,6% C, 1% Si și 0,1% S. Fonta astfel obținută este supusă desulfurării, cu CaC_2 introdusă cu ajutorul azotului, astfel încît după desulfurare fonta conține 0,01...0,02%S.

Modificarea are loc cu magneziu în oală, gradul de asimilare al acestui element fiind ridicat (60...70%). La trecerea fontei în oala de turnare are loc postmodificarea cu ajutorul ferosiliciului.

Controlul procesului de modificare se realizează turnînd probe ∅16 mm, care sînt supuse unei analize structurale rapide (max. 2 min), timp în care fonta este menținută în oală. Piesele turnate vor conține 90—95% Gv, dacă probele (∅ 16 mm) au 50% Gn și 50% Gv. În cazul în care această structură nu este realizată, se completează modificarea.

Structura fontei în piesele turnate rămîne practic constantă, dacă menținerea după modificaea nu depășește 10 min [185].

Se pot produce fonte cu 30...100% Gv, prin modificarea cu FeSiMg, fonta fiind elaborată în cubilouri bazice [455].

Obținerea fontelor cu grafit vermicular prin modificare cu magneziu mai este semnalată în Elveția și Suedia [253].

Utilizînd fonte cenușii cu 3,7% C, 1,7% Si și 0,3% Mn, precum și fonte hipereutectice, au fost obținute fonte cu grafit vermicular în cazul în care s-a plecat de la max. 0,03% S, iar fontele au fost modificate cu 0,75...1% FeSiMg (5% Mg), astfel încît magneziul

Scanned with OKEN Scanner

remanent să fie cuprins în limitele 0,015...0,02%. Creșterea conținutului de sulf inițial determină mărirea consumului de modificator (FeSiMg). Modificarea fontelor cu Ni-Mg nu a condus la formarea grafitului vermicular [95].

O serie de alte lucrări susțin posibilitatea obținerii grafitului vermicular, în cazul în care se utilizează cantități scăzute de magneziu, insuficiente pentru o nodulizare completă [59, 239, 293].

Astfel, [19] se recomandă utilizarea unor fonte cu un carbon echivalent de max. 4,4% și un conținut de sulf ce nu depășește 0,015%. În vederea obținerii grafitului vermicular fontele sînt modificate cu magneziu, realizîndu-se un conținut remanent de 0,01...0,025%.

Experimentările efectuate de către autori au condus la stabilirea unor tehnologii de obținere a fontelor cu grafit vermicular, utilizîndu-se în acest scop modificatori din sistemul FeSiCaMg, modificarea avînd loc în forma de turnare [305, 315, 329]. Au fost utilizați modificatori cu conținut scăzut de magneziu (4...6% Mg) și fonte cu compoziția: 3,0—3,3%C, 2,0...2,2% Si, 0,4—0,5% Mn, max. 0,1% P, max. 0,06% S, la un grad de saturație în carbon $S_c = 0,85—0,90$.

Schema rețelei de turnare cu camera de reacție, este prezentată în figura 2.8.

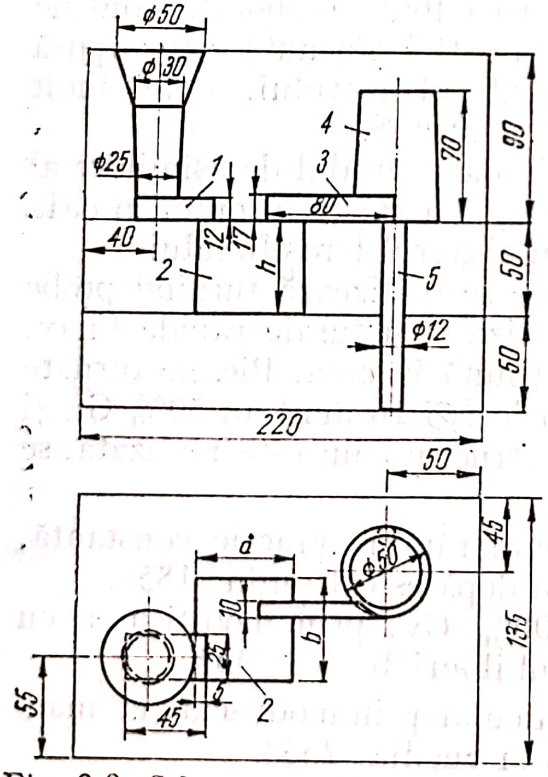


Fig. 2.8. Schema rețelei de turnare cu cameră de reacție [305, 315];

1 — canal alimentare cameră de reacție; *2* — camera de reacție; *3* — canal evacuare din camera de reacție; *4* — colector de zgură; *5* — alimentator piesă.

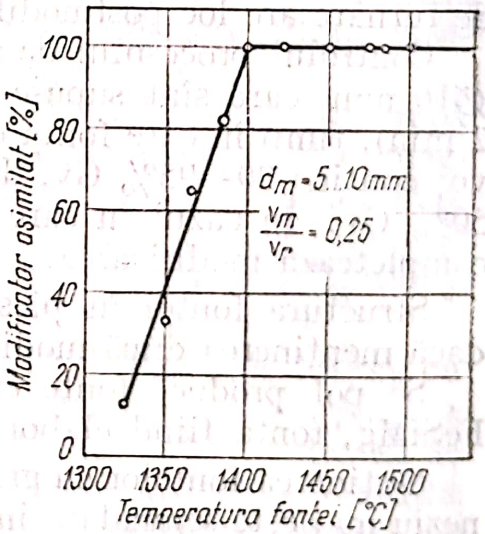


Fig. 2.9. Influența temperaturii fontei asupra asimilării modificatorului în cazul modificării în formă [305].

Scanned with OKEN Scanner

Un rol important în realizarea asimilării modificatorului din camera de reacție îl joacă temperatura fontei, a cărei valoare trebuie să depășească 1400°C (fig. 2.9). Timpul scurt în care există un contact între fonta ce trece prin camera de reacție și modificator impune în mod deosebit utilizarea unor temperaturi ridicate ale fontei. În cazul modificării în formă, factorul temperatură se manifestă mult mai puternic decît la modificarea în oală, unde volumul mai mare de fontă și durata de contact fontă-modificator mai îndelungată permite o asimilare avansată a elementelor modificatoare și la temperaturi mai scăzute [302, 365].

Pentru încălzirea și topirea granulelor de modificator din camera de reacție se consumă o cantitate de căldură (Q) a cărei valoare, în unitatea de timp (τ) se poate calcula cu relația [282]

$$dQ = \lambda\,(T_f - T_M)\,dS \cdot d\tau, \qquad (2.6)$$

unde: λ este coeficientul de transmitere a căldurii; T_f — temperatura fontei; T_M — temperatura modificatorului; dS — suprafața de contact fontă-modificator.

Rezultă deci că temperatura fontei și granulația modificatorului determină în mod direct cantitatea de căldură primită de modificator.

Pentru rețeaua prezentată în fig. 2.8, s-au dovedit a fi optime, grade de ocupare, cu modificator, a camerei de reacție, de 40...50% la o granulație de 3—5 mm.

Caracteristicile fontelor cu grafit vermicular, obținute prin modificarea în formă sînt prezentate în tabelul 2.3 [305].

Tabelul 2.3

FONTE CU GRAFIT VERMICULAR OBȚINUTE PRIN MODIFICAREA ÎN FORMĂ [305[

Modificator %	Grafit	Masa metalică	Rezistența la tracțiune R_m N/mm²	Alungirea A %	Duritatea HB
1,5	Gv+30...40% Gl	60% P	410	2	240
2,0	Gv+10...20% Gl	85% P	420	2	270

Un caz particular îl constituie modificarea fontelor în forma de turnare, în strat superficial. Au fost efectuate experimentări pe probe de tipul lingotierelor, la care modificatorii au fost fixați la suprafața miezului, obținîndu-se grafit vermicular pe o adîncime de 0,5...10 mm. Au fost încercate diferite variante de modificare, respectiv utilizarea unor modificatori FeSiMg, FeSiCaMg, NiSiMg, cu diferite conținuturi de magneziu, precum și amestecuri între magneziu și ferosiliciu sub formă de pulbere.

Scanned with OKEN Scanner

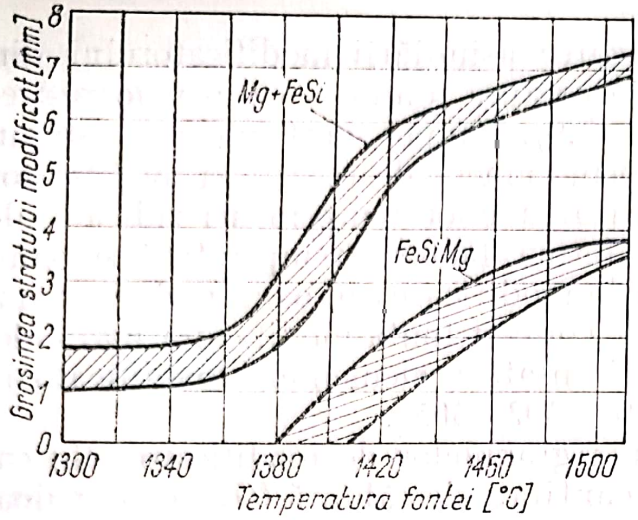


Fig. 2.10. Influența temperaturii și a tipului de modificator asupra grosimii stratului modificat la modificarea superficială a fontelor [324].

Grosimea stratului de fontă modificată, gradul de modificare și stabilitatea efectului modificator depind în mare măsură de conținutul de sulf și temperatura fontei, cantitatea de fontă supusă modificării, tipul, granulația și compoziția modificatorului, modul de fixare al acestuia etc.

În fig. 2.10 este prezentată influența temperaturii fontei, a tipului de modificator și a modului de fixare al acestuia pe miez asupra grosimii stratului de fontă modificată (probe tip bucșă, cu grosimea de 40 mm).

Utilizarea amestecului constituit din magneziu și ferosiliciu, sub formă de pulbere, a condus la obținerea celei mai mari grosimi a stratului modificat. Pentru fiecare caz în parte se impun anumite valori ale temperaturii, avînd în vedere faptul că la temperaturi scăzute nu se realizează o asimilare corespunzătoare, în timp ce la valori prea mari, pierderile de magneziu sînt foarte intense.

Fonte cu grafit vermicular sau fost obținute și în cazul modificării în oală cu FeSiCaMg a fontelor destinate turnării lingotierelor, obținîndu-se structuri cu grafit vermicular în peretele lingotierei (la C.S.V. Călan).

Acțiunea comună a oxigenului și sulfului, respectiv a magneziului și sulfului asupra structurii fontelor cu grafit vermicular e prezentată în lucrarea [183]. Grafitul vermicular este obținut la o compoziție chimică: 3,75%C, 2,32%Si, 0,34% Mn și 0,023% Mg. Se apreciază că la conținuturi scăzute de azot (<0,005%) proprietățile acestor fonte sînt doar în mică măsură mai mici decît cele ale fontelor cu grafit nodular (FCD40), dar net superioare celor înregistrate la fontele cenușii (FC25).

Rezultatele similare sînt semnalate și de către o altă lucrare japoneză [340].

În prezent se constată preocupări susținute în vederea realizării unor tehnologii perfecționate de modificare a fontelor, în condițiile utilizării magneziului metalic sau a modificatorilor cu magneziu. În acest sens se poate semnala utilizarea unor clopote de modificare perfecționate, care permit folosirea modificatorilor FeSiCaMg (9...10% Mg), pentru obținerea a 600...5000 kg fontă cu grafit vermi-

Scanned with OKEN Scanner

cular sau nodular. Durata modificării este de 1,0...5,0 min, iar durabilitatea utilajului este de 50...200 modificări ([448].

O perfecționare a procedeului „Sandwich" o constituie „TIP-proces", care prevede utilizarea unor oale cilindrice cu „buzunar", cu care se realizează modificarea, postmodificarea și turnarea fontei. Acest procedeu prezintă avantajul realizării unor grade avansate de asimilare a magneziului, a unei poluări mai reduse și a unei reținere mai riguroase a zgurei [120].

Experimentările efectuate de către autorii prezentei lucrări au condus la stabilirea unor tehnologii de intensificare a efectului modificator, de creștere a gradului de asimilare a magneziului, în condițiile unui efect piroforic scăzut, prin utilizarea depresurizării (vidării), la modificarea fontei în oală și în forma de turnare [372, 373].

Analizînd modificarea fontei cu magneziu, în condițiile suflării fontei cu o serie de gaze (C_2H_2, CH_4, Ar, N_2, aer) s-a constatat un proces de demodificare și respectiv o trecere de la grafitul nodular la cel vermicular. În vederea obținerii fontelor cu grafit vermicular, se recomandă suflarea fontei la 1420°C cu gaz metan [411].

Desulfurarea fontei cu CaC_2 ($S<0{,}02\%$) și modificarea cu Mg sau modificatori cu Mg, prin procedeul Sandwich sau suflarea cu gaze asigură obținerea în bune condiții a fontelor cu grafit vermicular [211].

Deși constituie o tehnologie relativ simplă, modificarea fontelor cu cantități mici de magneziu prezintă dezavantajul unei mari instabilități: dacă magneziul asimilat de către fontă depășește limita superioară a formării grafitului vermicular, în structura fontei apare grafit nodular; la cantități mai mici de magneziu, apare grafitul lamelar. Din această cauză, majoritatea tehnologiilor de obținere a grafitului vermicular, utilizate în prezent, prevăd introducerea, alături de magneziu și a altor elemente modificatoare (Ce, Ca, Y), precum și a unor elemente antimodificatoare (Ti, Al Sb), astfel încît domeniul în care se formează grafitul vermicular să fie lărgit. Se remarcă deci lărgirea acestui domeniu în ambele sensuri, respectiv către grafitul nodular (de către Ce, Ca, Y) și cel lamelar (Ti, Al, Sb).

2.3.2.2. *Apariția grafitului vermicular în urma demodificării fontei*

La menținerea fontei după modificare, magneziul remanent scade, conform relației:

$$Mg_{rem} = [Mg]_t \cdot e^{-K \cdot \tau} \quad [\%], \tag{2.7}$$

în care: Mg_{rem} este conținutul de magneziu remanent al fontei, la un moment dat, în %; $[Mg]_i$ — conținutul de magneziu remanent al fontei, imediat după modificare, în %; τ — timpul de menținere după modificare, în min.; K — factor.

Factorul K depinde de o serie de factori, cum ar fi: temperatura fontei la modificare, compoziția modificatorului, natura căptușelii, atmosferă etc.

Mărirea temperaturii fontei în momentul modificării determină creșterea valorii factorului K.

Compoziția modificatorilor cu magneziu influențează în mare măsură valoarea factorului K din relația 2.7, deci implicit pierderile de magneziu (tabelul 2.4) [21].

Pierderile de magneziu se datoresc atît evaporării cît și interacțiunilor care au loc în timpul în care magneziul se găsește în fonta lichidă (v. § 2.3.1).

Micșorarea conținutului de magneziu al fontei, în urma menținerii după modificare, conduce la apariția grafitului vermicular, alături de cel nodular.

Se remarcă faptul că schimbările structurale, datorate menținerii fontei după modificare, afectează în mai mică măsură proprietățile mecanice, decît acțiunea elementelor antimodificatoare (fig. 2.11).

Pierderile de magneziu, datorate menținerii după modificare determină apariția, în cea mai mare parte a grafitului vermicular, în timp ce sub acțiunea elementelor antimodificatoare se formează în principal grafitul degenerat (tip N-ASTM). Menținerea fontelor

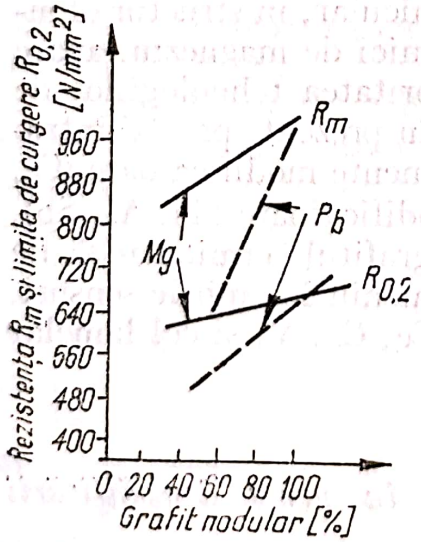


Fig. 2.11. Influența proporției de grafit nodular, asupra rezistenței fontei, sub influența magneziului) (—) și plumbului (— —) [298].

Tabelul 2.4

VALOAREA CONSTANTEI K [RELAȚIA (2.7)] ÎN FUNCȚIE DE TIPUL MODIFICATORULUI [21]

Modificator	Magneziu %	Constanta K min^{-1}
FeSiMg	9	0,061
FeMgC	2	0,056
FeMgSi	5	0,052
FeSiMgCe	9	0,026

Scanned with OKEN Scanner

cu grafit nodular, diferite perioade de timp după modificare, constituie deci o posibilitate de obținere a fontelor cu grafit vermicular. În această direcție, se remarcă un brevet din URSS (Nr. 2157021/77), bazat pe obținerea fontelor cu diferite forme de grafit, prin demodificare.

Se recomandă o tratare a fontelor cu 1...3% modificator cu magneziu, urmată de o menținere izotermă la 1420—1460°C, timp de 15...60min. Înainte de turnare este necesară o postmodificare cu FeSi75. Procedeul prezintă însă dezavantajul unui control dificil al formei grafitului.

2.3.3. Utilizarea magneziului și a elementelor antimodificatoare

2.3.3.1. *Elemente antimodificatoare*

Problema acțiunii de nodulizare sau de împiedicare a nodulizării grafitului a preocupat pe cercetători încă de la apariția fontelor cu grafit nodular. Trebuie avut însă în vedere faptul că acțiunea unor astfel de elemente depinde în mare măsură, de prezența sau absența sulfului în fontă și de viteza de răcire a pieselor turnate [228].

Acțiunea a o serie de elemente asupra grafitului în sistemul Fe-C-Si, este prezentată în tabelul 2.5. Rezultă deci că în fontele tehnice acțiune nodulizantă au în special elementele din grupele II și III b, din sistemul periodic, în timp ce în aliajele Fe-C-Si pure,

Tabelul 2.5

ACȚIUNEA UNOR ELEMENTE ASUPRA GRAFITULUI ÎN SISTEMUL Fe-C-Si [228]

Acțiune nodulizantă				Acțiune antinodulizantă			
În prezența sulfului și oxigenului (fonte tehnice)		În absența sulfului și oxigenului (fonte pure)		În prezența sulfului și oxigenului (fonte tehnice)		În absența sulfului și oxigenului (fonte pure)	
Răcire înceată	Răcire rapidă	Răcire înceată	Răcire rapidă	Răcire înceată	Răcire rapidă	Răcire înceată	Răcire rapidă
Mg, Ca, Y	Mg, Ca, Y	Li, Mg	Li, Na, K	Li, Na	Li, Na	Na, K	As, Sb
La, Ce	La, Ce	Ca, Sr	Mg, Ca, Sr	Sr, Ba	Ba, Zn	Zn, Cd	Bi, Te
		Ba, Y	Ba, Zn	Zn, Cd	Cd, Al	As, Sb	
		La, Ce	Cd, Ce	Al, K	Sn, Pb	Bi, Te	
		Th	Th, Sn	Sn, Pb	As, Sb		
			Al, Y, La	As, Sb	Bi, Te		
				Bi, Te	K, Sr		

Scanned with OKEN Scanner

în special la o viteză de răcire ridicată, o astfel de acțiune au și unele elemente din alte grupe (I, IIb, IIIa, IV). De remarcat faptul că unele elemente cu acțiune evident antinodulizantă în fontele tehnice (Zn, Cd, Al, Sn, Li) au o acțiune nodulizantă în fontele pure, la o viteză de răcire ridicată.

Elementele cu acțiune antinodulizantă directă fac parte, în special, din grupele Ib, IIIa, IV și V ale sistemului periodic, respectiv: Zn, Cd, Al, Sn, Sb, Pb, As, Bi. O acțiune antinodulizantă indirectă manifestă elementele din grupa IVa (Ti, Zr, Hf) în timp ce elementele antinodulizante cu acțiune generală se găsesc în grupa VI (O, S).

În prezența titanului puterea de acțiune a o serie de elemente se mărește, astfel că ele devin periculoase și la conținuturi mai scăzute (fig. 2.12) [281].

Acțiunea combinată a elementelor antimodificatoare poate fi exprimată și prin valoarea unor factori complecși, care reunesc influența mai multor elemente. Un astfel de factor, a cărui acțiune a fost verificată de către autorii prezentei lucrări [319] a fost stabilit de Th. Thielman [397] prin relația:

$$K_1 = 4{,}4\ \text{Ti} + 1{,}6\ \text{Al} + 2{,}0\ \text{As} + 2{,}3\ \text{Sn} + 5{,}0\ \text{Sb} + 290\ \text{Pb} + 370\ \text{Bi} \qquad (2.8)$$

Pentru factorul K_1, Th. Thielman recomandă valori de maxim $1 \pm 0{,}1$, la un conținut de magneziu remanent de 0,04...0,08%.

Elementele superficial-active se clasifică în următoarele grupe [196].

a) Elemente efectiv nodulizante: Mg, Y, Th, Li, Ce^{3+}, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tu, Lu (prognozate Sc, Am, Pm).

b) Elemente slab nodulizante: Ca, Ce^{4+}, La, Na, Sr, Ba, K, Rb, Zr, Jb (prognozate Eu, Np, Hf, Pa, Pu, Ac).

c) Elemente antinodulizante: Te, As, Sb, Sn, Al, In, Cd, Cu, Ag, Ti, Pb, Bi, Ga, B, N, O, H, S, Se.

Acțiunea antimodificatoare a elementelor poate fi scrisă sub forma:

$$K_{EA} = \frac{\Delta H_{298}^{EM}}{\Delta H_{298}^{S} + \Delta H_{298}^{O} + \Delta H_{298}^{N} + \Delta H_{298}^{H}} = \frac{\Delta H_{298}^{E.M.}}{\Sigma \Delta H_{298}}, \qquad (2.9)$$

în care: K_{EA} este coeficientul relativ al acțiunii elementelor antimodificatoare; ΔH_{298}^{EM} – entalpia la formarea combinațiilor elementelor antimodificatoare cu cele modificatoare, în kcal/atom g; $\Sigma \Delta H_{298}$ – suma energiilor de formare a combinațiilor chimice a elementelor antimodificatoare cu S, O, N, H, în kcal/atomg.

În fig. 2.13 sînt prezentate valorile factorului K_{EA}, pentru principalele elemente antimodificatoare și modificatoare (Mg, Ca, Na). Se constată că valorile obținute prin calcul (K_{EA}) coincid cu cele

Scanned with OKEN Scanner

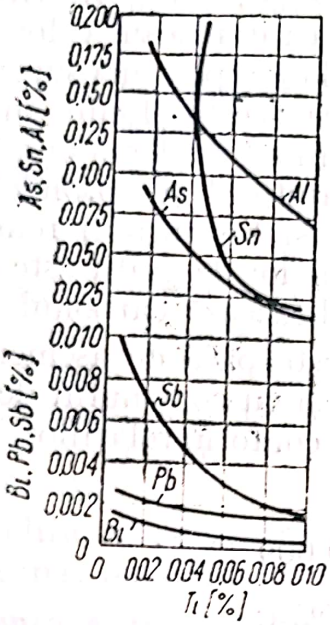


Fig. 2.12. Conținutul critic al unor elemente, în funcție de cantitatea de titan a fontei [281].

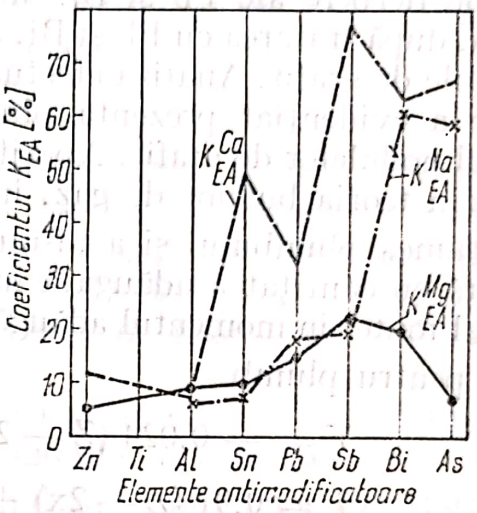


Fig. 2.13. Factorul de influență a elementelor antimodificatoare la modificarea cu Ca, Na, Mg [196].

din practică, în sensul că elementele cu cea mai puternică acțiune antimodificatoare sînt Bi, Sb, Pb, iar cu acțiune mai slabă Zn, Ti, Al, Sn, As.

Într-o serie de lucrări [46, 127, 128, 405, 409] se urmărește rolul celor mai importante elemente cu acțiune antimodificatoare, reușind să se stabilească acțiunea acestora asupra grafitului.

Studiind influența unor elemente, prezente în mod curent în compoziția fontelor (S, Te, Al, B, Cu, As, Sn, Pb, Bi) se propune împărțirea acestora în trei grupe, în funcție de acțiunea asupra magneziului [128]:

1) S, Se, Te — elemente ce interacționează cu magneziul.

2) Ti, Al, B, Cu, As, Sn, Sb — elemente ce se distribuie la granița austenită — celule eutectice;

3) Pb, Bi — elemente cu acțiune similară celor din grupele *1* și *2*, funcție de conținutul lor în fontă.

Elementele din prima grupă (S, Se, Te), formînd combinații cu magneziul, micșorează conținutul remanent al acestuia în fonte, astfel încît magneziul este insuficient pentru nodulizare, dar suficient pentru formarea grafitului vermicular.

Influența plumbului și bismutului. Astfel, la adaosuri crescînde ale conținutului de bismut (0,01, 0,025 și 0,05% Bi), grafitul își schimbă forma, de la cel lamelar spre cel nodular [409].

Rezultate similare au fost obținute și în cazul în care s-au introdus cantități mari de bismut (1,0%) și plumb (1,0%) în fonte hi-

Scanned with OKEN Scanner

pereutectice (3,8%C, 2,1%Si respectiv 4,7%C, 2,1%Si). Grafitul nodular a fost obținut numai în cazul în care adaosul celor două elemente s-a realizat în topituri, încălzite la temperaturi superioare celor de fierbere ale Pb și Bi. Menținerea acestor fonte, în stare lichidă, după tratarea cu Pb și Bi, a determinat scăderea numărului de nodule de grafit. Analiza efectuată cu ajutorul microsondei electronice a evidențiat prezența plumbului și bismutului remanent în jurul nodulelor de grafit. Apariția nodulelor de grafit este explicată prin teoria bulelor de gaz, în care difuzează carbonul [46].

Acțiunea plumbului și a bismutului este pusă de asemenea în legătură cu cantitatea adăugată în fontă și cu conținutul de magneziu al fontei în momentul adăugării lor, conform relațiilor [406]:

— pentru plumb

$$Y = -0{,}024\,(Z - 2x) + 0{,}009\ [\%]; \tag{2.10}$$

$$T = 0{,}91\,(Z - 2x) + 0{,}09\ [\%]; \tag{2.11}$$

— pentru bismut

$$Y = -0{,}027\,(Z - 0{,}25\,x) + 0{,}004;\ [\%]; \tag{2.12}$$

$$T = 0{,}84\,(Z - 0{,}25\,x) + 0{,}01;\ [\%]; \tag{2.13}$$

în care: Y este conținutul remanent al plumbului, respectiv bismutului, în %; T — conținutul remanent de magneziu, în %; Z — conținutul de magneziu al fontei, în momentul introducerii plumbului și bismutului, în %; X — cantitatea de plumb și bismut adăugat, în %.

În structura fontei au fost găsite combinații de tipul $PbMg_{16}$ și $BiMg_2$, cele două elemente fiind considerate ca fiind deosebit de dăunătoare la valori de peste 0,002...0,004%, cînd se formează rețele de grafit (grafit degenerat), mai periculoase decît grafitul lamelar. Pentru bismut, se stabilește ca valoare critică un conținut de 0,007%, iar pentru plumb, 0,004% [406].

Urmărind influența concomitentă a plumbului, bismutului și antimoniului, în cazul unor fonte modificate cu FeSiMgCe, a fost pusă în evidență posibilitatea neutralizării acțiunii lor prin intermediul ceriului [34]. Au fost utilizați modificatori cu 0,4%, 0,19% și 0,01% Ce, iar conținuturile celor trei elemente au variat în limitele 0,001%, 0,005%, 0,01% și 0,02% fiecare. Fontele, postmodificate cu FeSi75, au fost turnate în probe cu grosime mare (cub cu latura de 127 mm). Conținutul de magneziu remanent a fost cuprins în limitele 0,03...0,07%. În cazul utilizării modificatorilor fără ceriu (0,01% Ce) toate probele au prezentat grafit vermicular, în timp ce în cazul în care modificatorii au conținut 0,19...0,45% Ce, grafitul vermicular nu mai apare în structură, la un magneziu remanent de peste 0,04%.

Scanned with OKEN Scanner

Plumbul, bismutul și antimoniul acționează ca elemente perlitizante în fontele turnate, conform relațiilor:

$$\begin{aligned} \%P &= 69189\,x^2 - 3114x + 52{,}66 \quad (\text{FeSiMgCe-0,45\%Ce}); \\ \%P &= 2104x + 8{,}8 \quad (\text{FeSiMgCe-0,19\%Ce}); \\ \%P &= 4859x - 0{,}52 \quad (\text{FeSiMgCe-0,01\%Ce}); \end{aligned} \tag{2.14}$$

unde: x = % Pb + % Bi + % Sb.

Plumbul și bismutul ca și alte elemente (Sb, As, Sn) nu formează compuși cu carbonul și siliciul și deci nu umectează particulele de grafit. Forțele de adeziune față de separările de grafit sînt foarte scăzute, în cazul acestor elemente ($75...95.10^{-7}$ j/cm²). Unghiul de umectare este de 136...149°, iar energia de reacție de 1,67...2,0. $.10^3$ j/mol [338].

La modificarea în formă, acțiunea plumbului și bismutului se manifestă mai puțin intens decît la modificarea în oală [310].

Influența antimoniului. Urmărind influența unor cantități de 0,028...0,072% Sb adăugat în fontă, s-a găsit ca valoare critică conținutul de 0,05% [406]. Conținutul de magneziu remanent nu a fost influențat, lucru explicat prin faptul că antimoniul nu formează combinații intermetalice cu magneziul. Alături de nodule, structura conține și grafit vermicular [406].

Influența antimoniului adăugat în încărcătură sau odată cu ferosiliciul în timpul postmodificării fontei, a fost urmărită de către lucrarea [53]. Au fost utilizate fonte cu 3,5...3,7%C, 2,5... ...2,6% Si 0,13,...0,15%Mn, 0,01...0,018%S, modificate cu FeSiMg și postmodificate cu FeSi85, turnarea avînd loc în probe cu grosimea de perete de 25,127 și 203 mm. Antimoniul a fost variat în lim itele 0,002...0,010%.

Prezența antimoniului în încărcătura cuptorului determină o acțiune mai accentuată asupra gradului de compactitate a grafitului, decît în cazul în care este introdus în fontă după modificarea cu magneziu.

În vederea asigurării obținerii grafitului nodular cu compactitate ridicată la fontele cu 2,5...2,6%Si, se recomandă un adaos de 0,002...0,005% Sb, care determină mărirea numărului de nodule de grafit [53].

Mărirea cantității de Sb peste 0,005% conduce la apariția grafitului vermicular.

Adaosul de Sb pînă la 0,005% determină mărirea cantității de perlită numai la probele de 25 mm, în timp ce la probele cu grosime mare de perete (127...203 mm) proporția de perlită practic nu se schimbă. Spre deosebire de antimoniu, adaosuri de cupru, staniu și arseniu determină creșterea proporției de perlită în piesele cu pereți groși.

Scanned with OKEN Scanner

Antimoniul determină de asemenea o creștere a gradului de dispersie a grăunților de ferită și perlită.

Variația antimoniului în limitele 0,002...0,005% nu influențează în mod deosebit proprietățile mecanice, dar o creștere la 0,01% determină scăderea alungirii.

La fontele modificate cu Ytriu, la un continut de 0,05...0,1%Sb s-a pierdut complet gradul de nodulizare al grafitului, în structură identificîndu-se compuși de tipul YSb [196].

Influența titanului și aluminiului. Urmărind influența titanului, variat în limitele 0,05...0,16%, se consideră că acest element nu formează combinații chimice cu magneziul, prezentînd o distribuție la limita celulelor eutectice [406]. De asemenea, titanul formează carburi în structura fontei.

Titanul este un element puternic superficial activ la contactul cu separările de grafit. Dizolvat în fier, deși în cantități mici, contribuie la mărirea umectibilității acestuia față de grafit. Lucrul mecanic de adeziune crește foarte mult și poate să atingă valori de 2 500...3 000.10^{-7} j/cm^2.

Titanul este absorbit la suprafața pachetelor de grafit, prezente în fonta lichidă, concentrîndu-se în proporții apropiate de cele necesare formării unui strat monoatomar sub formă de carburi.

Aluminiul, ca element carburigen, se comportă asemănător titanului. El mărește capacitatea fierului de umectare a grafitului, în special la temperaturi mai mari de 1200°C.

De remarcat faptul că titanul și aluminiul nu influențează practic forma separărilor de grafit, deși sînt elemente puternic desulfurante și dezoxidante. Căldura de formare a oxizilor este de $9 \cdot 10^5$ J/mol în cazul titanului și de 10,64·10 J/mol la aluminiu, iar cea de formare a sulfurilor de 208.10^3 J/mol pentru titan și 345,8.10^3 J/mol în cazul aluminiului. Această comportare poate fi explicată prin faptul că cele două elemente se dizolvă și formează carburi stabile în fonta lichidă.

Aluminiul și titanul pot fi deci considerate ca fiind active față de grafit, spre deosebire de o serie de alte elemente antimodificatoare (Bi, Pb, Sb, As, Sn), care sînt inerte.

Influența arsenului. A fost urmărită influența arsenului în fontele cu grafit nodular de înaltă puritate, cu 4,3%C [127].

Influența arsenului depinde în mare măsură de cantitatea adăugată. Astfel, la cantități mici, fonta a conținut grafit nodular. La valori mai mari apare grafitul vermicular în timp ce la valori ridicate, apare grafitul degenerat, filiform. Influența arsenului este pusă pe seama îmbogățirii în arsen a fazei lichide de la granița austenită-lichid. La conținuturi ridicate, se formează o fază bogată

Scanned with OKEN Scanner

în arsen, datorită segregației acestui element, sub forma unui eutectic ternar (Feα, Fe_3C, Fe_2As), cu temperatura de solidificare de 800°C.

Variind conținutul de arsen în limitele 0,04...0,18%, s-a stabilit ca valoare maximă admisă în fontă 0,11% [406].

Arsenul se încadrează în grupa elementelor ce nu formează combinații chimice cu magneziul.

În cazul fontelor modificate cu magneziu, au fost variate conținuturile unor elemente cu acțiune antimodificatoare: 0,015... ...0,026% Ti, 0,004...0,017% As, 0,010...0,021% Pb, suma lor variind în limitele 0,029...0,061% [157].

În absența elementelor antimodificatoare, fontele au conținut grafit nodular și o masă metalică preponderent perlitică (20...25%F)· caracteristicile mecanice fiind: $R = 485$ N/mm², $K = 2$ daj/cm², $A = 2{,}2\%$. În prezența a 0,015% Ti, 0,004% As și 0,010% Pb, caracteristicile au scăzut la $R_m = 302$ N/mm², $K = 1{,}2$ daj/cm², datorită formării grafitului vermicular și lamelar. La mărirea în continuare a conținutului celor trei elemente, caracteristicile mecanice scad și mai mult, datorită apariției formelor degenerate de grafit, deși masa metalică a devenit perlitică.

Influența telurului. O variație a conținutului de telur în limitele 0,0081...0,068% a condus la concluzia că formează combinații cu magneziul, doar în mică măsură, găsindu-se în masa metalică. Conținutul maxim admis de telur în fontele cu grafit nodular este de 0,012% [406].

2.3.3.2. *Modificarea fontelor cu Mg-Ti*

Prezența elementelor antimodificatoare alături de magneziu contribuie la lărgirea domeniului de formare a grafitului vermicular. Acest lucru este semnificativ ilustrat de către fig. 2.14, care scoate în evidență creșterea probabilității formării grafitului vermicular, în cazul utilizării combinației Mg-Ti față de modificarea fontei numai cu magneziu [333].

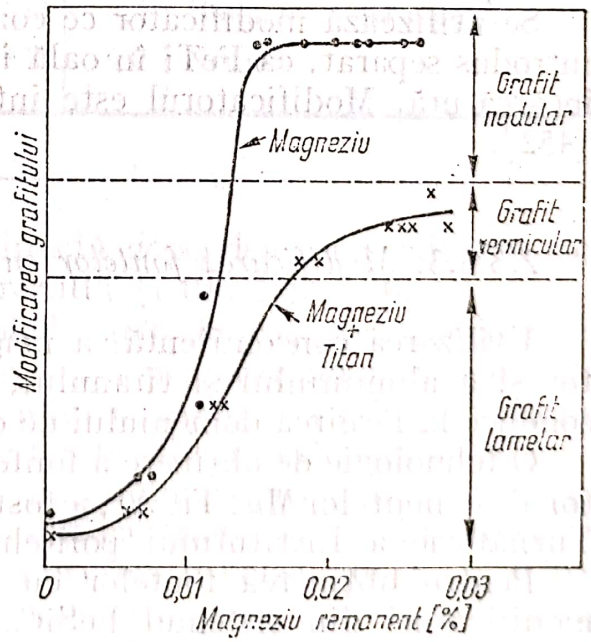


Fig. 2.14. Influența magneziului remanent asupra domeniului grafitului vermicular în cazul modificării fontei cu magneziu sau cu magneziu și titan [333].

Scanned with OKEN Scanner

Obținerea fontelor cu grafit vermicular este mai sigură, în cazul în care fonta conține 0,015—0,03% Mg și 0,08—0,10% Ti. Valori similare ale conținutului celor două elemente sînt recomandate și de către lucrarea [203]: 0,015...0,035% Mg și 0,06...0,13% Ti.

Analizînd diferite variante de obținere a fontelor cu grafit vermicular, lucrarea [293] consideră că cele mai bune rezultate sînt obținute, la un conținut de sulf sub 0,035%, prin modificarea cu magneziu și titan. La aceeași concluzie ajunge și lucrarea [64].

Fontele cu grafit vermicular, obținute prin modificarea cu Mg-Ti, prezintă o mare constanță a durității, între pereții groși și subțiri, în cazul unor piese cu greutatea de 185...1500 kg [74].

Modificarea fontei cu MgCaTiFeSi asigură obținerea grafitului vermicular, în timp ce la absența calciului (MgTiFeSi) apare grafit vermicular și lamelar [461].

Titanul poate fi introdus într-un prealiaj cu magneziul, sau cele două elemente se introduc separat. Astfel se recomandă introducerea ferotitanului în jetul de fontă la evacuarea din agregatul de elaborare, ceea ce asigură o asimilare a titanului în proporție de 80%, după care urmează modificarea cu FeSiMg [333].

Prin modificarea fontei cu magneziu, cu un adaos ulterior, de titan, se obțin fonte cu grafit vermicular, cu următoarele caracteristici: $R_m = 365 \pm 31{,}6$ N/mm²; $R_{0,2} = 278 \pm 21$ N/mm²; $A = 7{,}2 \pm 2{,}75\%$; 140 HB.

Un brevet englez recomandă obținerea fontelor cu grafit vermicular prin modificarea în formă, cu Mg și Ti.

Se utilizează modificator ce conține Mg și Ti, sau titanul este introdus separat, ca FeTi în oală înainte de turnare, precum și în încărcătură. Modificatorul este introdus într-o cameră de reacție [452].

2.3.3.3. *Modificarea fontelor cu Mg-Ti, Al*

Utilizarea concomitentă, a magneziului, ca element modificator și a aluminiului și titanului, ca elemente antimodificatoare, conduce la lărgirea domeniului de obținere a grafitului vermicular.

O tehnologie de obținere a fontelor cu grafit vermicular, cu ajutorul elementelor Mg, Ti, Al, a fost stabilită în cadrul catedrei de Turnătorie a Institutului politehnic București [313, 319, 368].

Pentru obținerea fontelor cu grafit vermicular sînt utilizați modificatori din sistemul FeSiCaAlTiMg, modificarea avînd loc în oală, prin procedeul „Sandwich".

Fontele, elaborate în cubilou și cuptoare electrice, prezintă compoziția chimică de bază încadrată în limitele: 3,5...3,7%C, 2,3...2,5%Si, 0,15,...0,32%Mn, 0.13...0,19%P și 0,025...0,15%S.

Scanned with OKEN Scanner

Acțiunea elementelor antimodificatoare este exprimată prin relația 2.8.

Corelația între acțiunea elementelor modificatoare și antimodificatoare este realizată prin intermediul factorului K_2 prin relația

$$K_2 = \frac{K_1}{Mg_{rem}} = \frac{1{,}6\ Al + 4{,}4\ Ti}{Mg_{rem}}, \qquad (2.15)$$

în care: Mg_{rem} reprezintă conținutul de magneziu remanent al fontei, în %.

În tabelul 2.6 și fig. 2.15 sînt prezentate cîteva din rezultatele obținute în urma modificării fontelor cu FeSiCaAlTiMg.

Tabelul 2.6

COMPOZIȚIA CHIMICĂ ȘI TIPUL GRAFITULUI [313, 319, 368]

Nr. șarjă	Al %	Ti %	Mg %	K_1	K_2	Tipul grafitului
0*	—	—	—	—	—	Lamelar
1	0,140	0,110	0,011	0,708	64,3	Lamelar
2	0,145	0,120	0,016	0,760	47,5	Lamelar
3	0,155	0,130	0,019	0,820	43,1	Lamelar + vermicular
4	0,090	0,120	0,020	0,672	33,6	Lamelar + vermicular
5	0,025	0,120	0,028	0,568	20,3	Vermicular
6	0,045	0,115	0,055	0,578	10,5	Vermicular
7	0,095	0,150	0,094	0,812	8,5	Nodular + vermicular
8	0,080	0,066	0,070	0,420	6,0	Nodular

* — fonta inițială

Forma grafitului este în directă dependență cu valoarea factorului complex K_2, așa cum rezultă și din fig. 2.16.

Factorul complex K_2 depinde atît de valoarea coeficientului K_1 [v. relația (2.8)] cît și de cea a magneziului remanent. Dacă asimilarea aluminiului și titanului în fontă este relativ constantă, valoarea magneziului remanent este direct influențată de o serie de factori, dintre care o mare importanță o are sulful fontei (fig. 2.17). Introducînd în fontă aceeași cantitate de modificator, pentru aluminiu și titan se obțin valori relativ constante ($K_1 = 0{,}919 \pm \pm 0{,}007$), în timp ce pentru magneziu valorile prezintă variații mari (tabelul 2.7) În aceste condiții, variază factorul complex K_2 și ca atare și tipul grafitului.

Un caz particular îl constituie obținerea fontelor de primă fuziune, cu grafit vermicular.

Scanned with OKEN Scanner

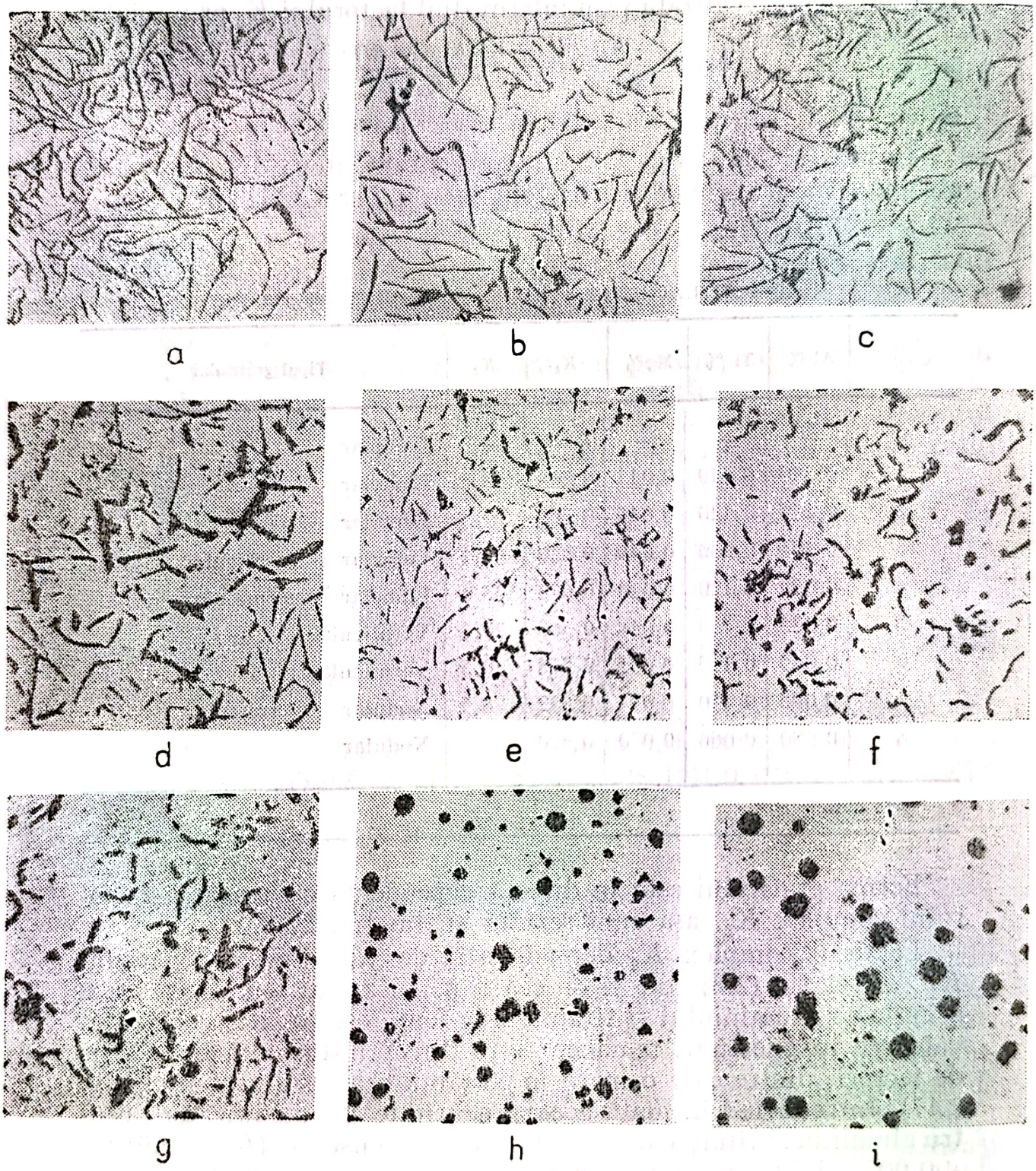


Fig. 2.15. Aspectul grafitului din fontele prezentate în tabelul 2.6.:
a — fonta 0; *b* —fonta 1, $K_2 = 64{,}3$; *c* — fonta 2, $K_2 = 47{,}5$; *d* — fonta 3, $K_2 = 43{,}1$; *e* — fonta 4, $K_2 = 33{,}6$; *f* — fonta 5, $K_2 = 20{,}3$; *g* — fonta 6, $K_2 = 10{,}5$; *h* — fonta 7, $K_2 = 8{,}5$; *i* — fonta 8, $K_2 = 6{,}0$.

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

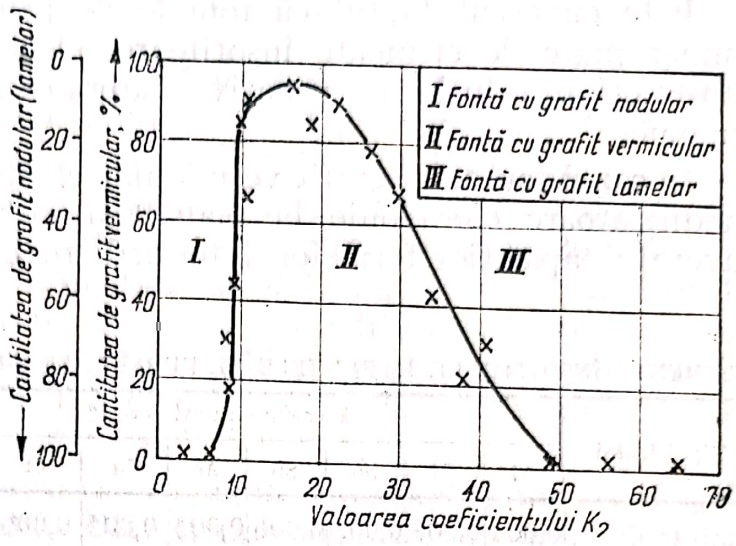


Fig. 2.16. Influența factorului K_2 asupra cantității de grafit vermicular.

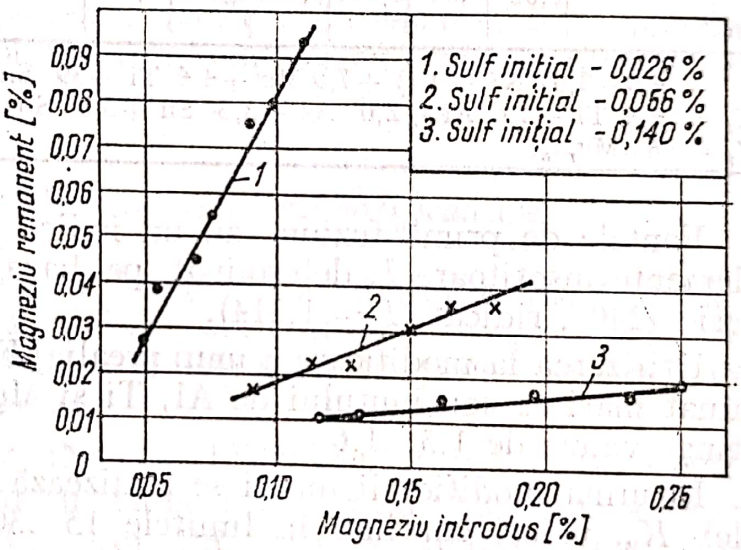


Fig. 2.17. Influența cantității de magneziu introdus și a sulfului din fonta inițială asupra valorii magneziului remanent.

Tabelul 2.7

INFLUENȚA SULFULUI ASUPRA FORMEI GRAFITULUI, ÎN FONTELE MODIFICATE [313, 319, 368]

Nr. șarjă	Sulf înainte de modificare %	Magneziu introdus %	Compoziția după modificare, %				K_1	K_2	Tipul grafitului
			Al	Ti	Mg	S			
7	0,026	0,11	0,095	0,150	0,094	0,013	0,812	8,5	Nodular + vermicular
9	0,056	0,11	0,090	0,155	0,022	0,029	0,826	37,5	Vermicular + lamelar
10	0,140	0,11	0,100	0,150	0,010	0,067	0,820	82,0	Lamelar

Este cunoscut faptul că fontele de primă fuziune conțin un număr mare de elemente însoțitoare, elemente care de cele mai multe ori au o influență negativă asupra calității fontei de a doua fuziune.

În cazul fontei cu grafit vermicular elementele cu acțiune antimodificatoare contribuie la realizarea unui grad de modificare favorabil apariției formelor intermediare de grafit (tabelul 2.8).

Tabelul 2.8

ELEMENTE ÎNSOȚITOARE ÎN FONTELE DE FURNAL, CU GRAFIT VERMICULAR [303, 319]

Tipul fontei	Elemente însoțitoare, %								I	K_1	K_2
	Al	Ti	Sn	Sb	As	Cu	Cr	Mg			
Înainte de modificare	0,001	0,008	0,005	0,006	0,005	0,005	0,008	0,0009	1,314	0,0883	98
După modificare	0,05	0,05	0,005	0,006	0,005	0,005	0,008	0,0129	1,557	0,3515	27,2

$I = 4{,}9+0{,}37(Ni + Cr) +7{,}9\,Mo +4{,}4\,Ti +39\,Sn +0{,}44\,Mn +5{,}6\,P$ [240]
$K_1 = 4{,}4\,Ti +1{,}6\,Al +2{,}0\,As +2{,}3\,Sn +5{,}0\,Sb +290\,Pb +370\,Bi$ [397]
$K_2 = K_1/Mg_{rem}$

Fontele de primă fuziune au un indice privind conținutul de elemente însoțitoare I, determinat pe baza relației lui J.C. Margerie [240], ridicat ($I = 1{,}314$).

Utilizarea la modificare a unui prealiaj FeSiCaAlTiMg a determinat mărirea conținutului de Al, Ti și Mg, astfel că indicele I atinge valori de 1,5...1,65

În urma modificării fontei se realizează, pentru factorul complex K_2, valori cuprinse în limitele 15...30, favorabile formării grafitului vermicular.

Modificarea fontelor de cubilou desulfurate cu CaC_2 cu 1,3... 1,5% (FeSiCaMg + 0,3% Al) și a celor elaborate în cuptorul cu inducție sau duplex cu un amestec (83,3...86,7% FeSiCaMg + 13,3 ...16,7% Al) asigură obținerea grafitului vermicular [260].

2.3.3.4. *Modificarea fontelor cu Mg-Ti, Sb*

Un brevet japonez recomandă modificarea fontelor cu Mg, Ti Sb, fontele cu grafit vermicular obținîndu-se în următoarele condiții: 3,0...3,7%C, 0,3...1,0% Mn, 0,05...0,15% P, 0,01...0,03%S, 2,0...3,0% Si, 0,02...0,09% Ti, 0,02...0,12 % Sb, $\frac{Ti + Sb}{Mg} \geqslant 5$, la o temperatură de turnare de 1380°C [78].

Prezența antimoniului, alături de Mg, Ce, Ti, Zr este semnalată și în cadrul altui brevet japonez [155].

Scanned with OKEN Scanner

2.3.3.5. *Modificarea fontelor cu Mg-Zr*

Grafit vermicular, la o masă metalică feritică, a fost obținut în cazul modificării unor fonte cu 3,16%C, 4,60%Si, 0,004%S cu 1,39% Zr, la o grosime de perete de 15 mm [137].

Un brevet din R.P.U. propune un modificator cu următoarea compoziție chimică: 5...30% Fe, 10...50% Si, 2,5...20%Mg, 5...30% Zr. Utilizat în cantitate de 0,5...2,5%, acest modificator asigură obținerea a peste 80% Gv, la modificarea fontei prin procedeul Sandwich. Conținutul de sulf al fontei supuse modificării nu afectează eficacitatea acestui proces, dar determină mărirea consumului de modificator [422].

În Japonia a fost brevetat un modificator ce conține 1...10% Ca, 2...10% Mg, max. 3% PR, max. 30% Fe și unul din elementele Zr (1...15%), Ti (1...10%), Sb (1...10%), rest Si.

Se recomandă realizarea sumei Zr + Ti + Sb $\leqslant$ 20%. Cu acești modificatori se asigură obținerea fontelor cu grafit vermicular perlitice [155].

2.3.3.6. *Utilizarea altor elemente antimodificatoare*

Cercetările efectuate în direcția folosirii altor elemente antimodificatoare, în vederea inhibării acțiunii celor modificatoare, continuă, în viitor obținîndu-se și alte posibilități de realizare a fontelor cu grafit vermicular.

Un patent japonez (Nr. 53-117989/28.03.1980) propune o fontă cu grafit vermicular cu compoziția: 2,5...3,5%C, 1,0...4,5% Si, 0,0006 ... 0,2% Ca, Ce (sau PR) > 0,1%, 0,005 ... 0,2% Mg, 0,002...0,02 % Al și (sau) 0,001...0,01% Bi.

În R.P. Chineză, se obțin fonte cu 3,5...3,9% C, și 2,4...3,0% Si, utilizîndu-se modificatori cu 3...5% Mg, 1...2% Al, 18...22% pămînturi rare, 3...5% Zn, max. 45% Si [463].

2.4. Utilizarea ceriului la obținerea fontelor cu grafit vermicular

2.4.1. Ceriul ca element modificator

Elementele din categoria pămînturilor rare (PR), introducîndu-se în fontă au o acțiune de desulfurare, dezoxidare și de micșorare a conținutului de gaze.

Scanned with OKEN Scanner

O serie de date cu privire la formarea oxizilor, sulfurilor și nitrurilor de cîteva dintre elementele din grupa pămînturilor rare (PR) sînt prezentate în tabelul 2.9, comparativ cu alte elemente existente în compoziția fontei [150].

Tabelul 2.9

CONDIȚIILE DE FORMARE A OXIZILOR, SULFURILOR ȘI NITRURILOR [150]

Elementul	Sulfuri		Oxizi		Nitruri	
	Formula	$-H_{298}$ kJ/mol (x4,18)	Formula	$-H_{298}$ kJ/mol (x4,18)	Formula	$-H_{298}$ kJ/mol (x4,18)
Lantan	La_2S_3	351	La_2O_3	457	LaN	72
Ceriu	CeS Ce_2S_3	118 421	CeO Ce_2O_3	233 445	CeN —	78,2 —
Neodim	Nd_2S_3	283	Nd_2O_3	442	—	—
Fier	FeS	28	Fe_2O_3 FeO	195 64	Fe_2N	3
Aluminiu	Al_2S_3	168	Al_2O_3	393	AlN	60
Magneziu	MgS	84	MgO	144	—	—
Mangan	MnS	48	MnO	33,2	MnN	31
Calciu	CaS	129	CaO	151	Ca_3N_2	105
Titan	TiS	52	TiO_2	218	TiN	80
Zirconiu	ZrS	—	ZrO_2	258	ZrN	82

La temperatura proceselor metalurgice, acțiunea desulfurantă, dezoxidantă și de formare a nitrurilor elementelor din grupa pămînturilor rare este deosebit de ridicată, produsele acestor reacții avînd temperaturi de topire și densități ridicate. Astfel, în cazul ceriului, temperatura de topire a sulfurilor este peste 1840°C, iar densitatea lor de 5,2...5,9 g/cm³. Același lucru se constată și în cazul oxizilor de ceriu, cu temperatura de topire de 1965°C și densitatea de 6,8 g/cm³ [245].

Urmărind interacțiunea chimică între ceriu și oxigenul din fonta lichidă, se apreciază că, la 1600°C, combinația CeO_2 se poate forma numai la $Ce \leqslant 5 \cdot 10^{-8}$ % și un conținut de oxigen de 0,16% în timp ce la conținuturi mai mari de ceriu se formează Ce_2O_3 [105].

Activitatea ceriului și oxigenului în fonta lichidă este:

$$\lg a_{Ce} = \lg [\%Ce] - 0{,}0029, \qquad (2.16)$$

$$\lg a_{Ce} = \lg [\%O] - 3{,}62\ [\%\ Ce] - 0{,}696. \qquad (2.17)$$

Scanned with OKEN Scanner

Luînd în considerare reacția de oxidare $2\,[Ce] + 3[O] = Ce_2O_3$, se obține:

$$\lg [\%O] = -\frac{\lg K_{Ce_2O_3}}{3} - \frac{2}{3}\lg [\%\,Ce] + \\ + \frac{10,86}{3}\,[\%Ce] + \frac{2,094}{3}\,,\ \lg K_{Ce_2O_3} = +\,21,71 \text{ la } 1400^\circ C. \qquad (2.18)$$

Datele din fig. 2.18 permit să se stabilească concentrația de echilibru a oxigenului în fonta lichidă, funcție de conținutul de ceriu [105]. Se constată că ceriul determină micșorarea conținutului de oxigen a fontei, dar peste anumite valori conținutul de oxigen începe să crească. Pentru a obține conținutul minim de oxigen în fontă ($3,3 \cdot 10^{-6}\%O_2$) este necesar 0,08% Ce.

Fonta lichidă, care conține ceriu și oxigen dizolvat reprezintă un sistem în afară de echilibru, astfel că în condiții reale, practic tot ceriul se găsește legat în oxizi. O parte din oxizi sînt îndepărtați, o altă parte rămîne însă în fontă, jucînd un rol important în procesul de cristalizare.

Ceriul are de asemenea capacitatea de a forma compuși stabili cu fierul, de tipul $CeFe_5$, $CeFe_2$ [87, 148, 234].

Prezența carburii de ceriu, CeC_2, în masa metalică a fontelor modificate, este semnalată de lucrarea [338].

Elementele din grupa pămînturilor rare (PR) măresc solubilitatea hidrogenului în fierul lichid, similar altor elemente (Ti, Ta, Mn, Nb) care primesc electroni de valență. Solubilitatea hidrogenului este micșorată de către elementele care cedează electroni de valență (C, Al, Si, Ni) (fig. 2.19) [44].

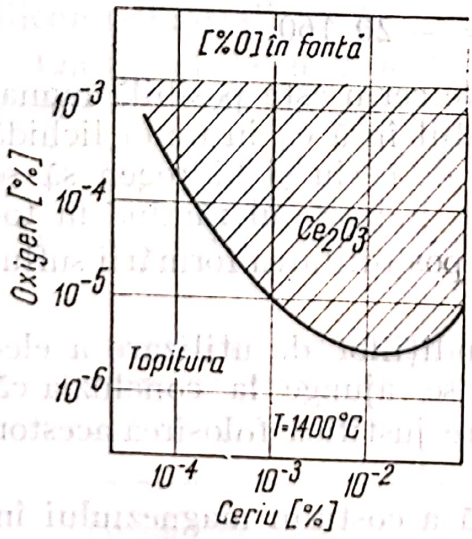


Fig. 2.18. Dezoxidarea fontei cu ceriu [105].

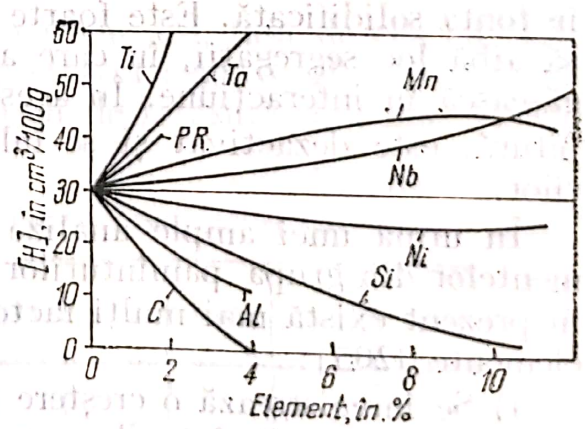


Fig. 2.19. Influența elementelor asupra solubilității hidrogenului în fierul lichid [44].

Atomii de PR nu numai că nu intensifică legătura Fe-H, dar intră ei înșiși în interacțiune cu atomii de hidrogen, datorită faptului că orbitele $4f$ și $5d$ sînt incomplete. Din această cauză, acești atomi formează cu hidrogenul compuși în interiorul cvasirețelei topiturii și a rețelelor cristaline a fazelor solide în fonta solidificată. Stabilitatea compușilor de acest tip crește cu scăderea temperaturii, ceea ce provoacă încetinirea micșorării solubilității hidrogenului în fonta în curs de răcire. Experimental, s-a dovedit că adaosurile de PR în fonta lichidă nu determină practic micșorarea conținutului de hidrogen ci fixarea acestuia în soluție, împiedicîndu-l să se separe sub formă de molecule.

Energia standard de formare a hidrurii de ceriu este

$$\Delta G^0_T\ (CeH_2) = 4{,}575\ .\ T \lg\ (pH_2/760) = \\ = -49\ .\ 970 + 36{,}28\ T. \qquad (2.19)$$

Hidrura de ceriu și ceriul se dizolvă unul în altul.

Reacțiile de formare a hidrurilor de ceriu sînt:

$$Ce(s) + H_2 = CeH_2;\quad \Delta G^\circ = -48.480 + 34{,}34 \cdot T, \qquad (2.20)$$

$$Ce(l) + H_2 = CeH_2;\quad \Delta G^\circ = -50.680 + 36{,}38 \cdot T. \qquad (2.21)$$

Din relația (2.21) rezultă că la $T > 1120°C$, $\Delta G > 0$, ceea ce înseamnă că formarea hidrurii nu este posibilă în condiții standard. La scăderea temperaturii, capacitatea de reacție între ceriu și hidrogen se mărește, respectiv:

$$T = 740°C;\quad \Delta G^0_T = -13\ 350;$$
$$T = 650°C;\quad \Delta G^0_T = -16\ 860;$$
$$T = 550°C;\quad \Delta G^0_T = -20\ 160.$$

Rezultă deci că formarea hidrurii de ceriu este posibilă numai în fonta solidificată. Este foarte probabil însă ca în fonta lichidă să aibă loc segregații, în care atomii de ceriu și hidrogen să se găsească în interacțiune. În acest mod, hidrogenul rămîne în topitură, este dezactivat și se înlătură posibilitatea formării suflurilor.

În urma unei ample analize a condițiilor de utilizare a elementelor din grupa pămînturilor rare se ajunge la concluzia că în prezent există mai mulți factori care justifică folosirea acestor elemente [205]:

1) Se înregistrează o creștere rapidă a costului magneziului în raport cu cel al pămînturilor rare. Astfel, costul Ce-FeSi a scăzut, în perioada 1951...1977 cu pînă la 4 dolari/kg, în timp ce costul Mg-FeSi a crescut cu 9 la 16 dolari/kg.

Scanned with OKEN Scanner

2) Se micșorează posibilitățile de utilizare a magneziului pentru modificarea fontei, datorită faptului că acest element este tot mai folosit la fabricarea unor piese, pe bază de magneziu, de înalte performanțe.

3) Gradul de asimilare a magneziului la modificarea fontei este de regulă sub 50%, acest proces fiind caracterizat de un grad de poluare avansat.

În același timp însă, se remarcă o serie de limite ale tehnologiilor de modificare cu ceriu:

a) Modificarea cu ceriu este efectivă în special la fontele hipereutectice.

b) Tendința de subrăcire și deci apariția cementitei libere la viteze de răcire mari sau grosimi de perete mici este mai mare decît în cazul utilizării magneziului.

c) Tendința de flotare a grafitului este mai accentuată decît în cazul modificării cu magneziu.

Aceste limite de utilizare a ceriului nu sînt totuși restrictive, avînd în vedere faptul că, în marea majoritate a cazurilor, fontele au gradul de saturație în carbon supraunitar.

2.4.2. Modificarea cu ceriu în vederea obținerii grafitului vermicular

În prezent există o bogată experiență în direcția producerii fontelor cu grafit vermicular, în urma modificării cu ceriu [458] introdus în fontă sub forma combinațiilor sale: mischmetall (MM) feroceriu (FeCe), feroceriu-mischmetall (FeCe-MM) sau sub forma unor prealiaje complexe, pe bază de pămînturi rare (silicolantan, silicomischmetall etc.).

Consumul de modificator este determinat direct de conținutul de sulf al fontei (tabelul 2.10 și fig. 2.20).

Se consideră că modificarea cu ceriu are, față de cea cu Mg-Ce-Ti, cîteva avantaje: se elimină efectul negativ al titanului remanent, poluare mai scăzută, volum de retasură mai mic [253].

Tabelul 2.10

CONSUMUL DE Ce-MM FUNCȚIE DE CONȚINUTUL DE SULF AL FONTEI [353]

Sulful inițial al fontei, în %	0,003	0,012	0,033	0,076	0,132	0,160
Consum de Ceriu-mischmetal (CeMM), în %	0,05	0,10	0,25	0,67	1,05	1,20

Scanned with OKEN Scanner

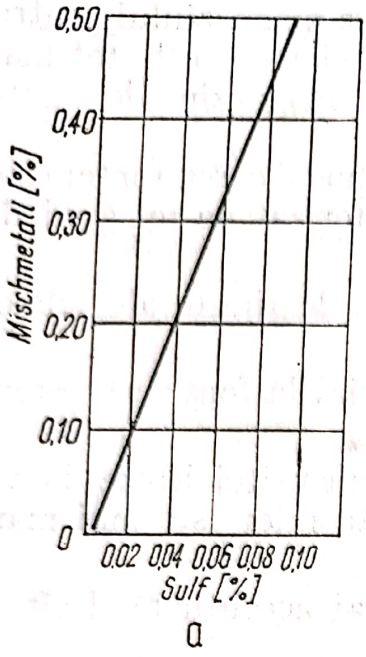


Fig. 2.20. Consumul de mischmetall funcție de conținutul de sulf al fontei, după [191] (*a*) și [331] (*b*).

Rezultate similare au fost obținute și în cazul turnării segmenților de piston din fontă cu grafit vermicular, obținută prin modificarea cu Ce-MM (fig. 2.20) [191].

Fontele, elaborate în cuptoare cu inducție din deșeuri de Fgv și fontă nouă și supraîncălzite la 1530...1540°C, au fost modificate, la o temperaură de 1460...1490°C, cu Ce-MM (49%Ce), cu o granulație de 2...5 mm. Posmodificate cu 0,5% FeSi75, fontele au fost turnate la 1400...1430°C.

În cazul unor grosimi de perete scăzute, se recomandă următoarele relații între proporția de Ce-MM și sulf:

$$\text{Grosime perete} > 10 \text{ mm}, \quad \frac{\%\ \text{Ce–MM}}{\%\ \text{S}} = 6...18;$$

$$\text{Grosime perete} < 10 \text{ mm}, \quad \frac{\%\ \text{Ce–MM}}{\%\ \text{S}} = < 10.$$

Fonte cu 0,05% S, modificate cu 0,035% FeCe, sînt caracterizate de o rezistență la încovoiere $R_i = 498$ N/mm², $f = 3{,}93$ mm și 193 *HB*.

În cazul unor fonte de primă fuziune, dezoxidate și desulfurate în prealabil ($S < 0{,}003\%$), un adaos de 0,03...0,10% Ce-MM (preferabil 0,05%) conduce la obținerea grafitului vermicular. Pentru fonte cu 0,016%S și 0,01%O_2 este necesar un adaos de 0,15% CeMM.

Scanned with OKEN Scanner

Se consideră că includerea pămînturilor rare în prealiaje complexe, pe bază de siliciu, asigură o utilizare mai economică a acestora [150, 159, 187, 188].

Utilizarea silicolantanului (3%Ce, 24%La, 1%Nd, 45—55%Si, 3...5%Al, 2—4%Ca, 10—15%Fe) și a silicomischmetalului (16%Ce, 8%La, 4%Nd, 45...55%Si, 3...5%Al, 2...4%Ca, 10...15%Fe) au condus la obținerea unor fonte cu grafit vermicular cu următoarele caracteristici mecanice: R_m = 380—450 N/mm², A = 2,5...4,5%, 163...170 *HB*. Plecînd de la conținuturi de sulf de 0,04%, au fost utilizate cantități de 0,5...0,7% prealiaje complexe Si-PR [159].

Un adaos de 0,2% silicomischmetall (50%PR) determină obținerea grafitului vermicular, la grosimi de perete 25...125 mm. Sub 25 mm apare grafit nodular [187].

O turnătorie produce în mod curent fonte cu grafit vermicular, alături de fonte cenușii (Fc 300) și cu grafit nodular. Încărcătura cuptoarelor constă din 50% deșeuri de oțel și 50% deșeuri proprii, obținîndu-se fonte cu 3,8%C și 0,02...0,03%S.

Modificarea fontelor se realizează cu materiale ce conțin ceriu:

— CaSiCe — (10% Ce, 13% PR);
— Si-Ce — (25% Ce, 50% PR);
— MM — (50% Ce).

Fontele cu grafit vermicular astfel obținute au o rezistență la tracțiune de 310...400 N/mm² și o duritate de 150...177 *HB* [83, 84].

Menținerea fontelor, la temperatura de 1482°C, în cuptor, timp de 20...25 min de la modificarea (în cuptor) cu ceriu-mischmetall determină o scădere accentuată a ceriului remanent (fig. 2.21) [49].

Lantanul, prezent în grupa pămînturilor rare utilizate la obținerea grafitului vermicular joacă un rol important în reducerea tendinței de albire a fontelor, modificate cu aceste elemente [41, 382]. Cu cît conținutul de lantan, în totalul elementelor din grupa pămînturilor rare, este mai ridicat, cu atît tendința de grafitizare este mai mare. Astfel, controlul lantanului în grupa pămînturilor rare are un rol important în obținerea fontelor cu grafit vermicular,

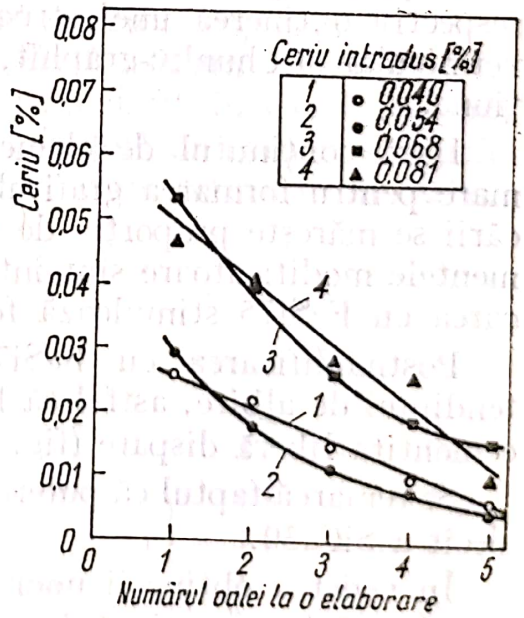


Fig. 2.21. Schimbarea conținutului de ceriu la menținerea fontei în cuptor (20...25 min) la temperatura de 1 482°C [49].

fără cementită liberă, la grosimi reduse de perete. Modificatorii ce conțin pămînturi rare, cu conținut ridicat de La și mai scăzut de Ce, au o acțiune antigrafitizantă mai scăzută.

Modificarea cu ceriu conduce la albirea fontei, la conținuturi scăzute de siliciu.

Fontele cu 0,04...0,06%S, la un conținut de siliciu de 1...5%, au o tendință de albire în funcție directă de cantitatea de ceriu-mischmetall adăugată [258].

Modificarea fontelor cu elemente din grupa pămînturilor rare determină o tendință ridicată de albire, ceea ce impune necesitatea unei tehnologii eficiente de *postmodificare*. Se urmăresc condițiile utilizării, ca materiale pentru postmodificare, a FeSi75 și SiCa30 [188].

Fontele elaborate în cuptoare cu inducție, au fost supraîncălzite la 1466°C și modificate, în oală, cu modificatori ce conțin 30% PR, postmodificarea avînd loc cu 0,2%SiCa30 sau 0,3 % FeSi75

În cazul turnării unor probe cu ∅12,7...∅127 mm, s-a constatat că postmodificarea cu SiCa asigură obținerea grafitului vermicular, la toate grosimile de perete. La utilizarea a 0,4% modificator se obține grafit vermicular, în probele ∅25...∅127 mm, postmodificarea avînd loc cu 0,2 sau 0,3% FeSi75. La micșorarea cantității de modificator la 0,31%, grafitul vermicular este obținut în cazul unei postmodificări cu 0,2% FeSi75, în timp ce 0,3% FeSi75 a condus la apariția grafitului lamelar.

În piesele groase, postmodificarea poate avea un efect negativ, respectiv ținerea unei structuri neomogene, cu grafit nodular, vermicular și Chunky-graphit, datorită segregării Ce și Ca pe secțiune.

Dacă conținutul de elemente modificatoare este suficient de mare pentru formarea grafitului vermicular, în urma postmodificării se mărește proporția de grafit nodular. În cazul în care elementele modificatoare sînt într-un domeniu de limită, postmodificarea cu FeSi75 stimulează formarea grafitului lamelar.

Postmodificarea cu FeSi75 sau SiCa30 asigură o scădere a tendinței de albire, astfel că la grosimi de perete de peste 25 mm cementita liberă dispare (fig. 2.22) [188].

Se remarcă faptul că puterea grafitizantă a FeSi75 este mai mare decît a SiCa30.

În vederea obținerii unor piese fără cementită liberă se recomandă mărirea conținutului de carbon și siliciu al fontei pînă la valori de 4,0% C și 3,5% Si [330]. Mărirea conținutului celor două elemente nu afectează practic rezistena la tracțiune a fontei, dar asigură o mărire a alungirii (fig. 2.23).

Scanned with OKEN Scanner

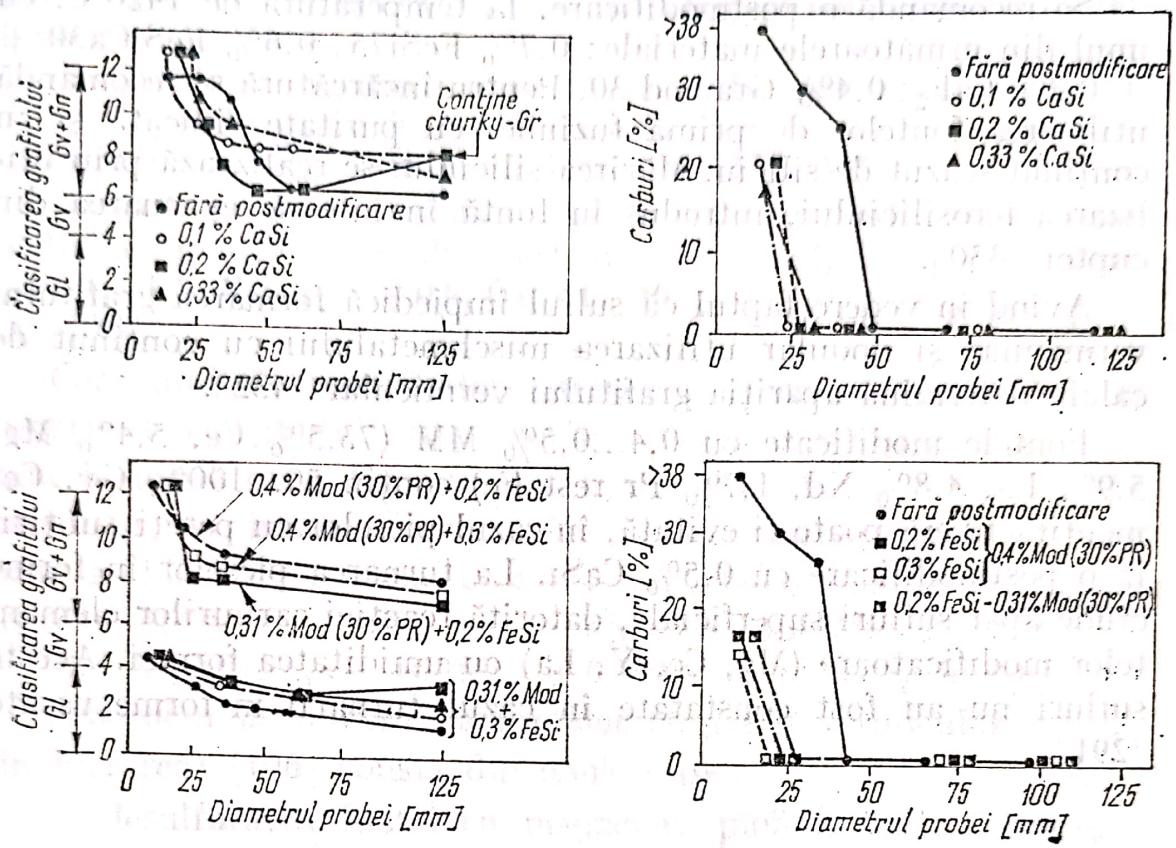


Fig. 2.22. Influența postmodificării asupra tendinței de albire a fontelor cu grafit vermicular [188].

Fontele au fost modificate cu 0,07% MM, la un conținut de sulf de 0,01% și cu 0,28% MM în cazul unui conținut inițial de sulf de 0,026%, postmodificarea avînd loc cu 0,7% FeSi75.

Postmodificarea fontelor cu FeSiCa30 asigură o reducere a tendinței de albire în mai mare măsură decît în cazul folosirii FeSi75. Se utilizează 0,6% FeSiCa la fontele cu carbon și siliciu ridicat și 1,0% FeSiCa, la fontele cu grad de saturație în carbon scăzut.

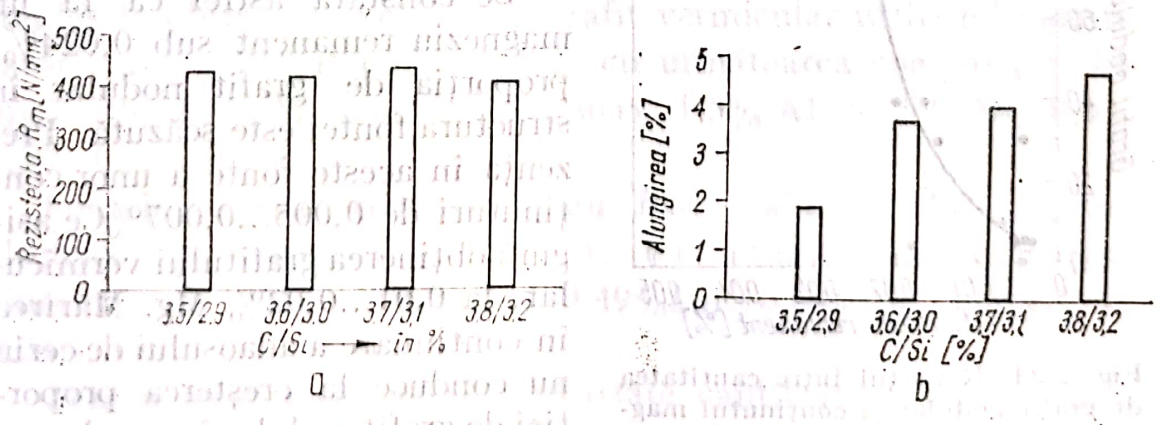


Fig. 2.23. Variația rezistenței la tracțiune (*a*) și alungirii (*b*) la fontele cu grafit vermicular, modificate cu MM, funcție de carbon și siliciu [330].

Se recomandă o postmodificare, la temperatura de 1420°C, cu unul din următoarele materiale: 0,7% FeSi75; 0,6% FeSiCa30 + + 0,3% CaF_2; 0,4% Gramod 30. Pentru încărcătură se recomandă utilizarea fontelor de primă fuziune, cu puritate ridicată și cu conținut scăzut de siliciu. Mărirea siliciului se realizează prin utilizarea ferosiliciului, introdus în fontă înainte de evacuarea din cuptor [330].

Avînd în vedere faptul că sulful împiedică formarea grafitului vermicular și nodular utilizarea mischmetalului cu conținut de calciu determină apariția grafitului vermicular [432].

Fontele modificate cu 0,4...0,5% MM (73,5% Ce, 5,4% Mg, 5,9% La, 4,8% Nd, 1,7% Pr rest Fe) conțin 50...100% Gv. Cementita liberă poate fi evitată, în cazul pieselor cu pereți subțiri, la o postmodificare cu 0,5% $CaSi$. La turnarea pieselor în forme crude apar sufluri superficiale, datorită reacției carburilor elementelor modificatoare (Mg, Ce, Y, La) cu umiditatea formei. Aceste sufluri nu au fost constatate în cazul turnării în forme uscate [291].

2.4.3. Modificarea fontelor cu magneziu și ceriu

Ceriul, adăugat alături de magneziu, acționează pe mai multe căi: contribuie la desulfurarea fontei, acționează ca factor de neutralizare a elementelor antimodificatoare, determinînd astfel o micșorare a conținutului minim de magneziu, pentru obținerea unui anumit grad de modificare.

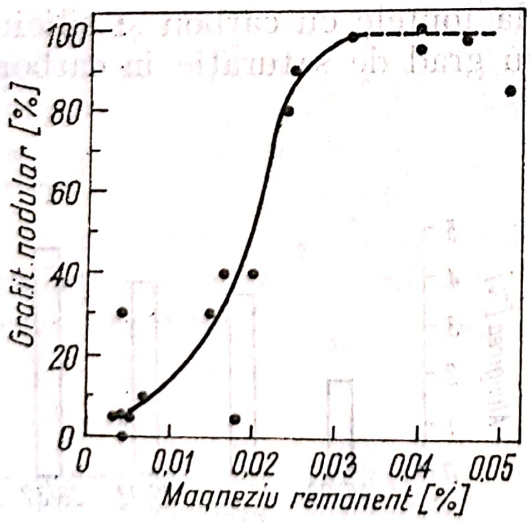


Fig. 2.24. Raportul între cantitatea de grafit nodular și conținutul magneziului remanent la fontele hipoeutectice [49].

Cantitatea de grafit nodular depinde în mare măsură de conținutul de magneziu remanent al fontei (fig. 2.24) [49].

Se constată astfel că la un magneziu remanent sub 0,024%, proporția de grafit nodular în structura fontei este scăzută. Prezența în aceste fonte a unor conținuturi de 0,005...0,007%Ce asigură obținerea grafitului vermicular, la 0,01...0,02% Mg. Mărirea în continuare a adaosului de ceriu nu conduce la creșterea proporției de grafit nodular în cazul unor conținuturi insuficiente de mag-

Scanned with OKEN Scanner

neziu, deşi este considerat ca principal element nodulizant la fontele hipoeutectice [49]

Posibilitatea obţinerii fontelor cu grafit vermicular, la o modificare cu Mg şi Ce în cantităţi insuficiente realizării grafitului nodular este prezentată şi în lucrările [334, 335].

Se pot produce lingotiere din fontă cu grafit vermicular, utilizînd modificatori din sistemul FeSiCaMgCe, cu compoziţia: 7.. 9% Mg, 3,5...4,0% Ca, 44...46% Si, 1,0...1,5% Al, 0,5 % Ce [108].

Consumul de modificator variază în limitele 0,6...1,0%, în funcţie de conţinutul iniţial de sulf, temperatura şi metoda utilizată la modificare. Fontele sînt postmodificate cu 0,5% FeSi75, care asigură eliminarea cementitei libere şi formarea feritei. Compoziţia chimică a fontelor cu grafit vermicular produse este următoarea: 3,7% C, 1,99% Si, 0,18% Mn, 0,047% P, 0,005%S, 0,010% Al, 0,015% Cr, 0,048% Cu, 0,001% Mo, 0,010% Sn, 0,016%V.

Procedeul de obţinere a fontelor cu grafit vermicular cuprins (în lucrarea) [106] constă din două etape:

— desulfurarea fontei cu magneziu, pînă la 0,01...0,006 %S;

— inocularea fontei cu ceriu, în vederea obţinerii grafitului vermicular.

Fontele obţinute prin acest procedeu au o structură preponderent feritică. Pentru a obţine o masă metalică de bază perlitică, este necesară utilizarea elementelor cu o acţiune perlitizantă (Cu, Sn). De asemenea, acest procedeu asigură o tendinţă mai scăzută de albire a fontei, după modificare. Tratarea cu ceriu are loc numai după îndepărtarea produselor desulfurării cu magneziu.

Experimentările efectuate de către autorii acestei lucrări au condus la obţinerea fontelor cu grafit vermicular utilizînd modificatorii din sistemul FeSiCaMgCe, cu următoarea compoziţie chimică: 40...50% Si, max. 3% Ca, max. 1,5% Al, 5...8% Mg, 0,6... 1,5% Ce, rest Fe.

Fontele supuse modificării au fost elaborate în cuptoare electrice cu inducţie de 3,5 t, cu următoarea compoziţie chimică: 3,22%C, 1,49%Si, 0,49%Mn, 0,042%S, 0,056% P, 0,04% Cr.

Pentru modificare au fost utilizate cantităţi de 0,5%, 1,0% şi 1,5% FeSiMgCaCe, postmodificarea avînd loc cu 0,5% FeSi75...

Scanned with OKEN Scanner

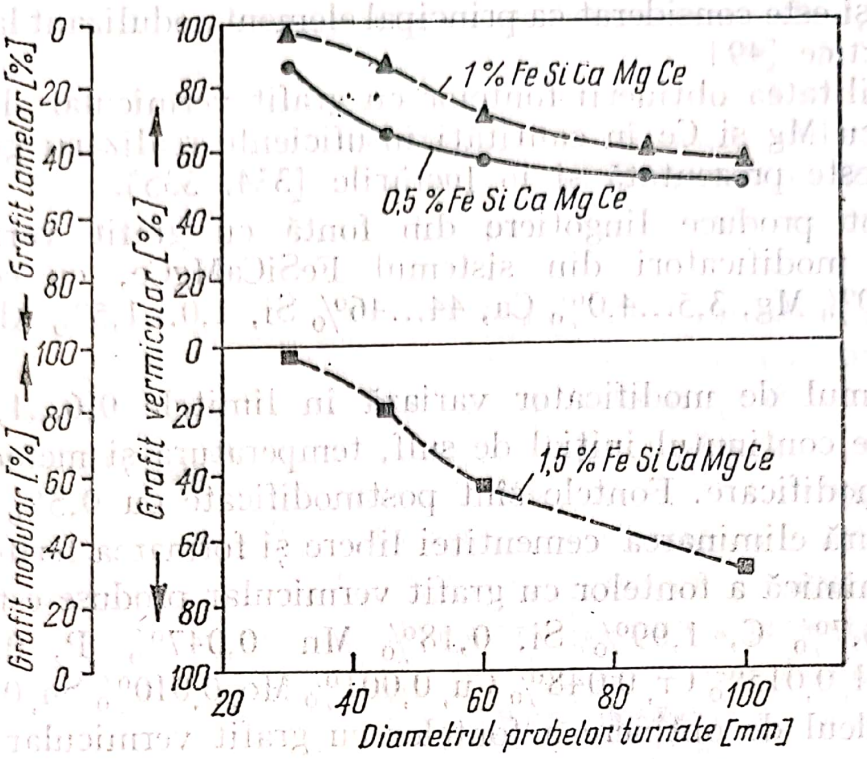


Fig. 2.25. Influența cantității de FeSiCaMgCe și a grosimii de perete asupra proporției de grafit vermicular [324].

Fontele modificate au fost turnate în probe cu grosimea de perete variind în limitele 30...100 mm.

Proporția de grafit vermicular, funcție de cantitatea de modificator și grosimea de perete este prezentată în fig. 2.25.

Prin reglarea cantității de modificator poate fi obținut grafit vermicular, la grosimi diferite de perete.

Analizînd compoziția unor modificatori din sistemul FeSiCaMgCe (PR), utilizați în cazul unor fonte de cubilou (T_f = 1360... 1380°C), se ajunge la concluzia că, conținutul de calciu trebuie limitat la 6%, la un raport (Ca/Mg) < 1,5, iar conținutul de elemente din grupa pămînturilor rare (PR) sub 2% [194].

Utilizînd 18 tipuri de modificatori din sistemul FeSiCaMgPR, cu 3,0...10% Mg, 0,5...1,3% PR (0,25...1,05% Ce) și 0,2...4,0% Ca, se evidențiază efectul pozitiv al ceriului, care determină micșorarea cantității de magneziu remanent necesar obținerii diferitelor forme de grafit. De asemenea, se semnalează faptul că la creșterea conținutului de calciu de la 0,2 la 1,5% viteza de dizolvare a modificatorului scade, în timp ce la 4,0% Ca aceasta este foarte mică, fiind necesară o mărire a temperaturii de modificare [88].

Scanned with OKEN Scanner

Ceriul determină producerea grafitului nodular în prezența unor conținuturi de magneziu sau în absența acestuia, în fontele hipereutectice, dar are un efect scăzut în cele hipoeutectice. Conținuturi de 0,006% Mg + 0,013% Ce asigură obținerea grafitului nodular numai la grosimi scăzute (3,2 mm), în timp ce la grosimi cuprinse între 25,4...101,6 mm apare grafitul vermicular [50].

Rezultatele unor experimentări privind utilizarea magneziului și a elementelor din grupa pămînturilor rare sînt prezentate în tabelul 2.11 [69]. Au.fost utilizate fonte cu 3,47% C, 1,97% Si, 0,43% Mn, 0,09% P, 0,028% S, modificate la 1430—1450°C și turnate în probe ∅30 mm. Modificarea a avut loc cu magneziu (99,8% Mg), ceriu metalic, FeSiCaMg, (40...52% Si, 5...12% Mg, 3,0% Ca, Fe-rest) și mischmetall-MM (45—55% Ce, 40...45% La, 2% Y, 2% FeSi etc.), cantitatea de fontă supusă modificării fiind de 8,0 kg. Fonte cu grafit vermicular, în condiții reproductibile, au fost obținute utilizînd magneziu și elemente din grupa pămînturilor rare sau numai acestea din urmă.

Tabelul 2.11

VARIANTE DE MODIFICARE A FONTELOR [69]

Nr. crt.	Modificator	Ponderea grafitului			Raportul între lungimea și grosimea grafitului vermicular *L/g*
		Gn %	Gv %	Gl %	
1	0,15% Mg (metalic)	18	70	12	7,7
2	0,20% Mg (metalic)	35	65	—	3,9
3	1% FeSiCaMg	—	4,8	95,2	50
4	1% FeSiCaMg +0,05% Ce	10	90	—	5,3
5	0,075% Mg (metalic) + + 0,075% Ce	—	85	15	7,7
6	0,075% Mg (metalic) + + 0,075% MM	—	90	10	6,3
7	0,15% Ce	—	70	30	10
8	0,20% Ce	6	94	—	6,7
9	0,15% MM	—	45	55	25
10	0,20% MM	—	62	38	10

În fig. 2.26 este prezentat aspectul grafitului în cîteva variante de modificare [69].

Scanned with OKEN Scanner

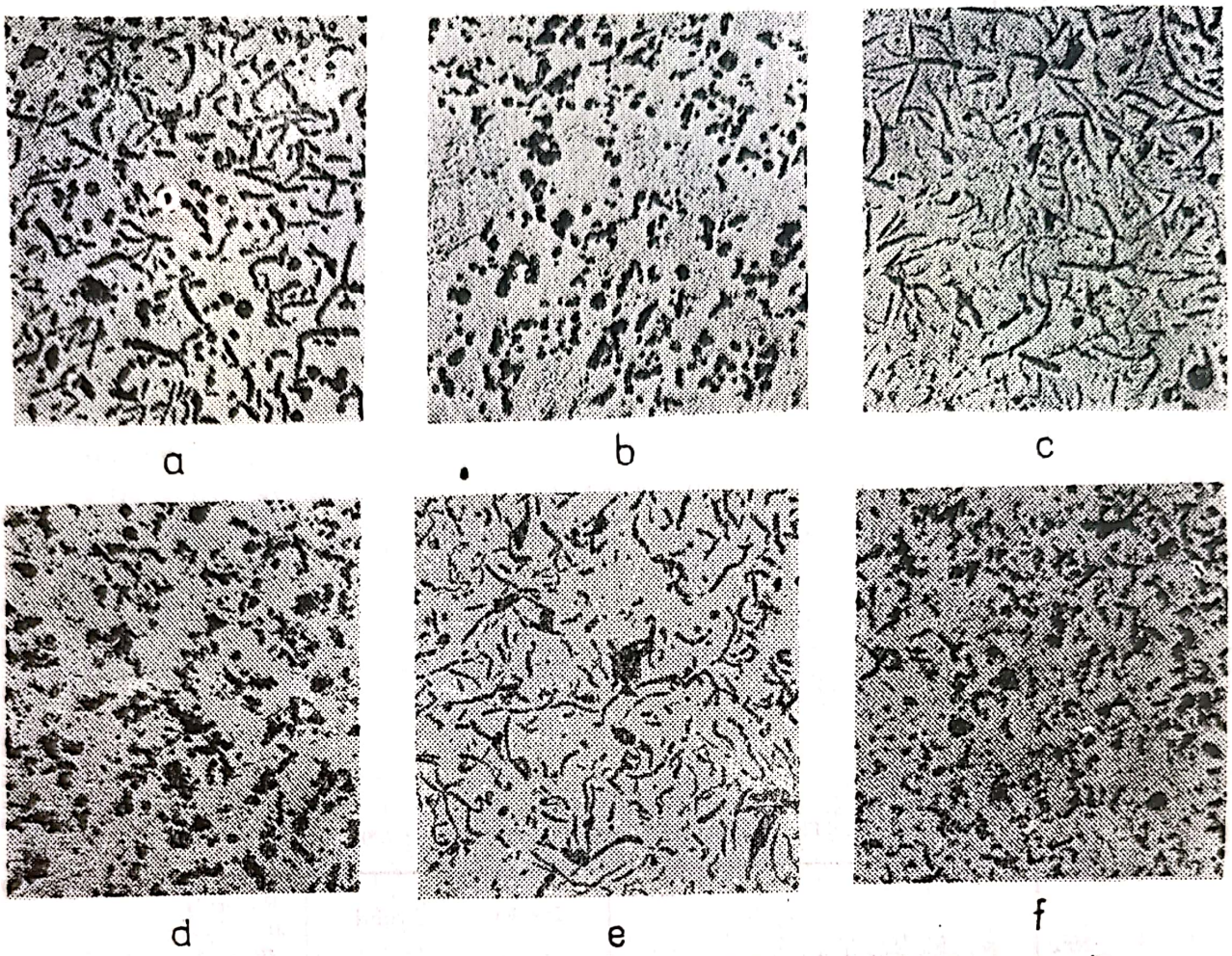


Fig. 2.26. Aspectul grafitului în fontele modificate cu Mg-Ce neatacate (× 100) [69]:
a — 0,15% Mg; *b* — 0,2% Mg; *C* — 1% FeSiCaMg; *d* — 1% FeSiCaMg + 0,05% Ce; *e* — 0,15% Ce; *f* — 0,20% Ce.

2.4.4. Utilizarea modificatorilor cu Ce, Mg, A

Utilizînd modificatori cu compoziția: 29...47% Si, 6...15%PR, 2...4% Mg, 4...12% Ba, 10...18% Al, rest Fe, au fost obținute fonte cu grafit vermicular și nodular [3]. Prezența aluminiului în compoziția modificatorului determină micșorarea efectului piroforic al reacției de modificare.

O analiză comparativă a obținerii fontelor cu grafit vermicular, prin modificarea cu pămînturi rare (PR), PR-Mg și PR-Mg-Al este realizată în lucrarea [7].

Modificarea fontelor cu FeSiCaMg are loc în condițiile realizării unui efect piroforic intens, al degajării unor cantități de praf, precum și al unei zgurificări accentuate, în special la conținuturi ridicate de calciu.

În cazul folosirii unor modificatori pe bază de elemente din grupa pămînturilor rare (de ex., Si-Y-MM), la fontele hipoeutectice se obține cu prioritate grafit vermicular.

La modificarea cu Si-Y-MM, grafitul vermicular a fost obținut la un conținut remanent de ceriu de 0,02...0,04%, în timp ce grafitul nodular este asigurat la Ce_{rem} = 0,10...0,14%. Cantități de ceriu remanent de peste 0,14% conduc la apariția cementitei libere.

În cazul unor modificatori cu magneziu și ceriu, grafitul vermicular este obținut la 0,010...0,015% Mg_{rem} și 0,025...0,030% Ce_{rem}.

Utilizînd modificatori complecși (FeSiCaAlBaMgCe), fonte cu grafit vermicular au fost obținute la conținuturi remanente de 0,010% Mg, 0,020% Ce și 0,25% Al.

La modificarea fontelor cu modificatori cu compoziția: 7,2% Mg, 8,4% Ca, 47,2% Si, 7,7% PR, rest Fe, prin postmodificare se poate regla tipul grafitului. Pentru postmodficare se utilizează amestecuri realizate din FeSi75, SiCa, FeSiZr și Al, care conțin 0,5...5,0% Al, Ca sau Zr.

În vederea obținerii fontelor cu grafit vermicular se recomandă utilizarea materialelor cu 2...2,5% Al, Ca, Zr, în timp ce pentru realizarea grafitului nodular aceste elemente trebuie limitate la 1,0...1,5%. Fontele cu grafit vermicular, obținute prin această tehnologie, sînt caracterizate prin caracteristici mecanice ridicate: R_m = 412...413 N/mm², A_5 = 2,0...2,5%, K = 1,96...2,45 daj/cm² și 170...190 *HB* [360.]

S-a pus la punct o tehnologie de obținere a fontelor cu grafit vermicular de la un conținut ridicat de sulf, prin modificarea cu FeSiCaAlMgCe [297].

În cazul unor modificatori cu conținuturi mai mari de magneziu și ceriu, precum și suficiente conținuturi de aluminiu și calciu, la creșterea conținutului de sulf se mărește consumul de modificator necesar obținerii fontelor cu grafit vermicular. Se pot obține deci fonte cu grafit vermicular la orice conținuturi de sulf, dar domeniul acestor fonte se îngustează la peste 0,09% S (fig. 2.27) [297].

Domeniul sulfului inițial, pentru trei metode de obținere a fontelor cu grafit vermicular, este prezentat în fig. 2.27, *b*.

Față de modificatori MgTiCaCe utilzarea modificatorilor MgCeCaAl permite lărgirea gamei conținuturilor de sulf inițial.

În cazul unor conținuturi de sulf de 0,12...0,13%, fonte cu grafit vermicular, au fost obținute la 1,75% FeSiCaAlMgCe, recomandîndu-se temperaturi de modificare cuprinse în limitele 1468—1510°C (fig. 2.28). La temperaturi mai scăzute se obține grafit

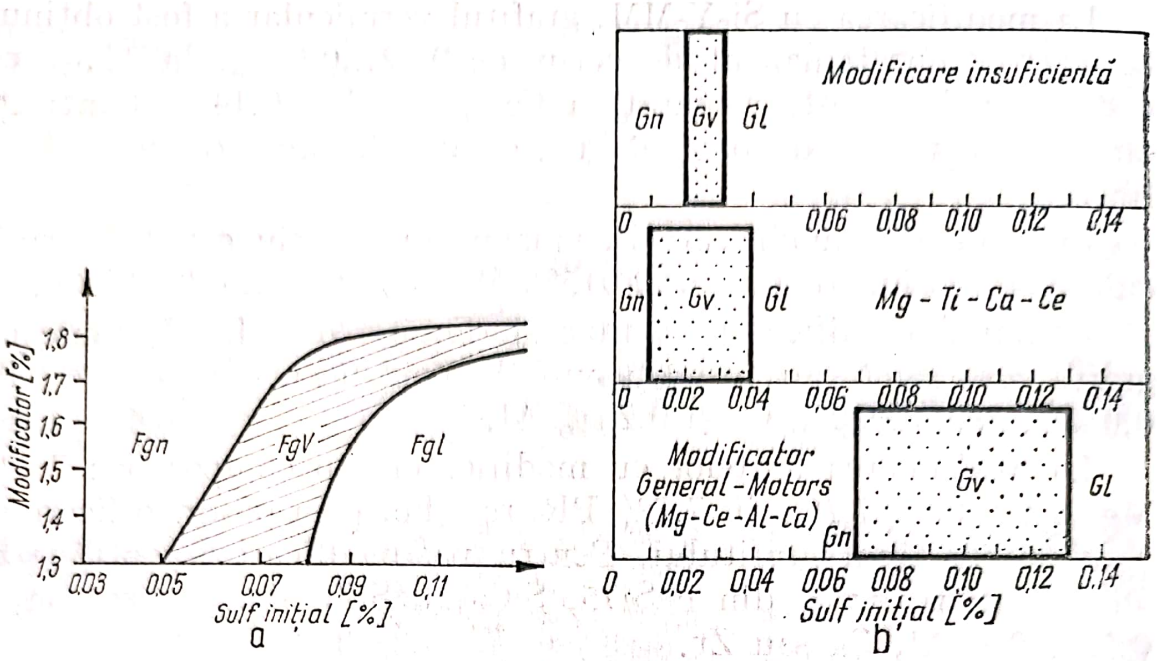


Fig. 2.27. Fonte cu grafit vermicular cu conținut ridicat de sulf [297].

nodular, în timp ce la valori mai ridicate ale temperaturii, grafitul devine lamelar [297]

Această tehnologie de obținere a fontelor cu grafit vermicular nu impune postmodificarea fontei, datorită conținutului ridicat de sulf care determină formarea unui număr mare de particule solide de CaS, CeS, MgS, ce constituie germeni de grafitizare. Doar în cazul unor fonte cu carbon echivalent scăzut, aliate cu crom și molibden, este necesară postmodificarea. Astfel, la 3,35% C, 2,26% Si, 0,28% Cr, utilizarea a 0,1% FeSi75 asigură eliminarea carburilor.

Prin această tehnologie au fost obținute fonte cu grafit vermicular, cu conținut ridicat de sulf, cu $R_m = 425$ N/mm² și $A = 2{,}5\%$. Au fost obținute piese cu grosimea de 3...6 mm fără carburi în stare turnată și cu o masă metalică de bază cu 50...100% F.

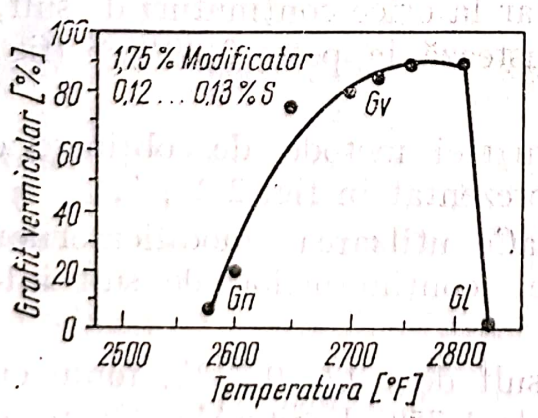


Fig. 2.28. Influența temperaturii de modificare asupra proporției de grafit vermicular [297].

2.4.5. Utilizarea combinațiilor CeMg—TiAl

Preocupările în direcția lărgirii domeniului de obținere a grafitului vermicular au condus la utilizarea unor elemente cu acțiune antimodificatoare (Ti, Al) în asociere cu cele cu acțiune no-

Scanned with OKEN Scanner

dulizantă (Mg, Ce) Această tehnologie de obținere a fontelor cu grafit vermicular se bucură în prezent de o mare atenție.

Pentru obținerea fontelor cu grafit vermicular cu ajutorul unui modificator simplu [95] au fost utilizați modificatorii din sistemele FeSiMg, FeSiMgCe și Ni-Mg, fontele supuse modificării fiind hipoeutectice (3,7% C, 1,7% Si, 0,3% Mn) și hipereutectice. Consumul de modificator a fost astfel calculat, încît magneziul remanent să nu depășească 0,03%.

În cazul utilizării unor materiale metalice de înaltă puritate, grafitul vermicular este obținut la un magneziu remanent de 0,015...0,02%, realizat la 0,75...1,0% FeSiMg (5% Mg). La un conținut mai mic de magneziu (<0,015%) se obține grafit lamelar, iar la cantități mai mari de magneziu (>0,025%) apare grafitul nodular

Un adaos de 0,06...0,13% Ti mărește limita superioară a magneziului remanent pînă la 0,03%. În acest caz, la fonte cu S $\leqslant$ $\leqslant$ 0,03%, un adaos de 0,75...1,5% FeSiMg (5% Mg) se asigură un conținut de magneziu remanent de 0,015...0,03%, favorabil formării grafitului vermicular. Creșterea conținutului de sulf al fontei determină mărirea consumului de modificator, pentru a obține un magneziu remanent în limitele arătate anterior. La utilizarea modificatorilor NiMg, nu a fost obținut grafit vermicular.

Ceriul și alte elemente din grupa pămînturilor rare constituie factori hotărîtori pentru obținerea grafitului vermicular, astfel că se recomandă utilizarea unor modificatori de tipul FeSiMgCeTi, cu un conținut de 0,1...0,2% Ce.

În cazul utilizării a 1,5% modificator cu 51,8% Si, 4,64% Mg, 4,97% Ti, 2,69% Al, 0,3% Ce-MM a fost constatat faptul că la creșterea conținutului de sulf al fontei capacitatea modificatorului de a asigura formarea grafitului vermicular se micșorează, în timp ce proprietățile mecanice se înrăutățesc.

Forma grafitului, exprimată cu ajutorul factorului de formă K_f (v. cap. 1) este înrăutățită odată cu mărirea conținutului de sulf al fontei. În fig. 2.29 este

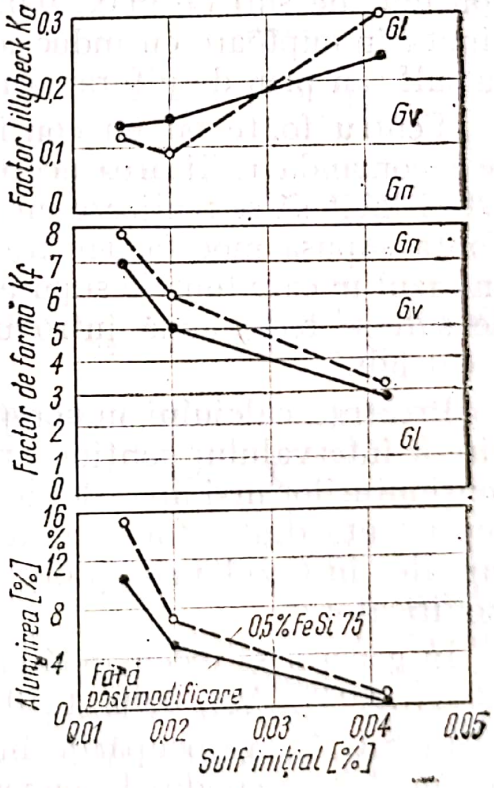


Fig. 2.29. Influența sulfului asupra factorului Lilybeck (K_a), factorului de formă (K_f) și alungirii fontelor [95].

prezentată influența sulfului din fontă (înainte de modificare) asupra factorului de formă (K_f), factorului Lilybeck (K_a) și alungirii.

Se observă că mărirea conținutului de sulf de la 0,015% la 0,041% determină trecerea de la grafitul nodular la cel lamelar, motiv pentru care se micșorează și alungirea fontelor. Se observă de asemenea că postmodificarea cu ferosiliciu are o influență pozitivă asupra grafitului, determinînd o mărire a plasticității.

În Anglia a fost realizat un modificator din sistemul FeSiMg TiCe, cu compoziția chimică: 30...80% Si, 3...15% Mg, 3...25% Ti, 0,05...1,0% Ce, Fe-rest. Se recomandă realizarea următoarelor rapoarte caracteristice:

$$Mg : Ti = 1 : 1 \text{ la } 1 : 2;$$
$$Mg : Ce = 50 : 1 \text{ la } 1 : 2.$$

Acești modificatori sînt utilizați în cantitate de 0,8—1,8% din fonta supusă modificării [96...99].

Avînd în vedere pierderile de magneziu și ceriu prin desulfurare, se consideră, ca economică, tehnologia de obținere a fontelor cu grafit vermicular care se bazează pe utilizarea unor fonte cu un conținut de sulf de max. 0,035%. O astfel de fontă poate fi obținută în cuptoare cu inducție, plecînd de la o încărcătură săracă în sulf sau prin desulfurarea fontei de cubilou.

Pentru fonte cu un conținut de sulf ce nu depășește 0,03%, se recomandă utilizarea acestor modificatori în cantitate de 1%, astfel încît să se realizeze un magneziu remanent de circa 0,025%. Fonta supusă modificării are temperatura de circa 1400°C [333]. În cazul în care fontele supuse modificării au un conținut mai mare de sulf se recomandă introducerea în compoziția modificatorilor a calciului.

Prezența calciului în compoziția modificatorului asigură o lărgire a intervalului conținuturilor de magneziu și o neutralizare a conținuturilor mai mari de sulf. Astfel, în fig. 2.30 este prezentată dependența dintre forma grafitului și conținutul de sulf al fontei inițiale, în cazul unor probe ∅ 100 mm și la o tratare cu 1,3% modificator.

În general se recomandă ca după modificare fontele să conțină 0,015...0,03% Mg, 0,06...0,10% Ti și circa 0,002% Ce.

În S.U.A., preocupările în direcția obținerii fontelor cu grafit vermicular au condus la punerea la punct a unor modificatori din sistemul FeSiCaTiAlMgCe, produși de către firma „Foote Mineral Company" din anul 1976 și cunoscuți sub denumirea de „Foote GG". Acești modificatori conțin 4,0...5,0% Mg, 8,5...10,5% Ti, 0,25...

Scanned with OKEN Scanner

0,35% Ce, 4,0...5,5% Ca, 1,0...1,5% Al, 48,0...52,0% Si, Fe-rest [204].

Utilizarea acestor modificatori asigură o producere stabilă a fontelor cu grafit vermicular, într-un domeniu mai larg decît în cazul în care sînt utilizați modificatorii clasici FeSiMg (fig. 2.31).

Acești modificatori se recomandă se se utilizeze în proporție de 1,0...1,3%, la o granulație de 30 mm, pentru fonte cu un conținut de sulf ce nu depășește 0,045% (o modificare stabilă se realizează la max. 0,03% S) [203, 204].

Experimentările efectuate cu acești modificatori au arătat că pentru obținerea fontelor cu grafit vermicular, la o grosime de perete medie (25...40 mm) și mare (50...65 mm) se pot utiliza limite largi ale compoziției chimice: 3,5...4,0% C și 1,7...3,0% Si, la un carbon echivalent $CE = 3,7...4,7\%$.

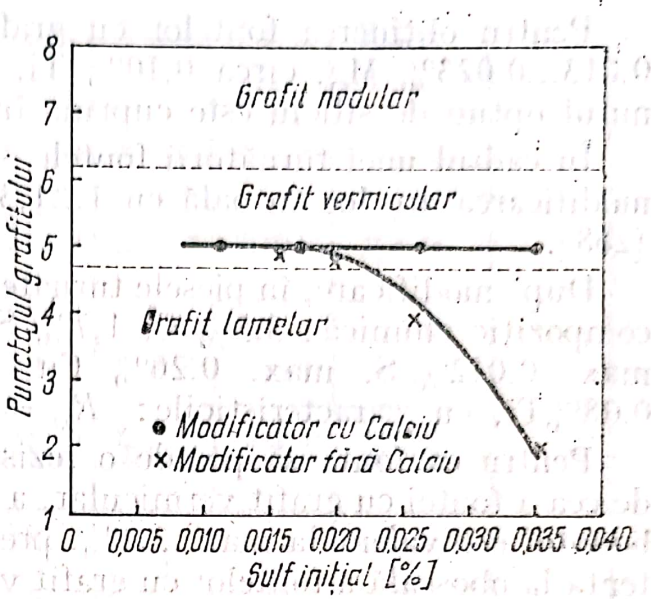


Fig. 2.30. Influența calciului din modificator asupra domeniului grafitului vermicular [203].

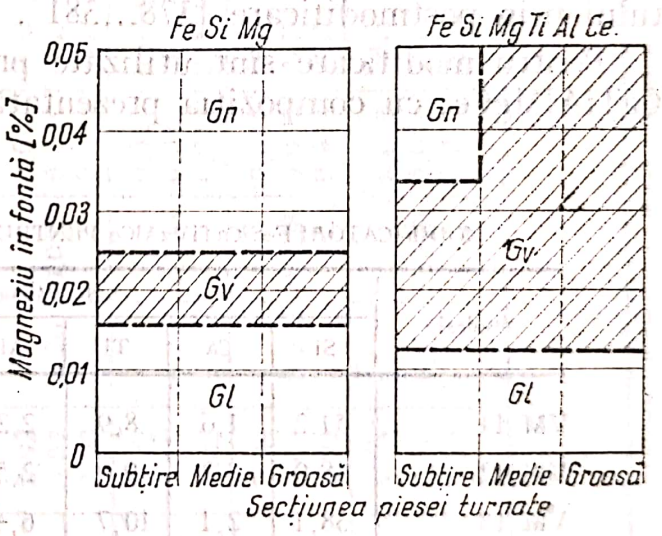


Fig. 2.31. Domeniile fontelor cu grafit vermicular în cazul modificării cu FeSiMg și FeSiMgTiAlCe [204].

La un carbon echivalent de valori medii și mari ($CE = 4,2...4,6\%$) se pot turna piese cu pereți subțiri, la o grosime de perete pînă la 12 mm. Conținutul de sulf impus fontelor înainte de modificare este de 0,02...0,04%, după modificare sulful fiind sub 0,01%. Conținuturi mai mari de sulf determină apariția grafitului lamelar, în timp ce la conținuturi mai mici de sulf se mărește cantitatea de grafit nodular din structură.

Cantitatea de modificator utilizată (1,0...1,7%) nu este limitată pentru obținerea fontelor cu grafit vermicular, depinzînd direct de conținutul de sulf al fontei. Acești modificatori sînt utilizați și la modificarea în formă [393].

Scanned with OKEN Scanner

Pentru obținerea fontelor cu grafit vermicular se recomandă 0,013...0,023% Mg, circa 0,10% Ti, și 0,004...0,01% Ce. Conținutul optim de siliciu este cuprins între 1,5...2,7%.

În cadrul unei turnătorii fontele sînt elaborate în cubilou, iar modificarea are loc în oală cu 1...1,3% modificator „Foote CG" [268].

După modificare, în piesele turnate, fontele prezintă următoarea compoziție chimică: 3,5% C, 1,7% Si, 0,3% Mn, max. 0,1% P, max. 0,012% S, max. 0,26% Cu, 0,006...0,025% Mg, 0,02... 0,08%Ti, cu caracteristicile: R_m = 350 N/mm², A = 2...6%.

Pentru ca fonta să posede o rezistență la tracțiune apropiată de cea a fontei cu grafit vermicular, a fost necesară micșorarea carbonului echivalent la max. 3,4%, precum și alierea fontei. Rezistența la oboseală a fontelor cu grafit vermicular obținute (la încovoiere) este de 140...210 N/mm².

O tehnologie de obținere a fontelor cu grafit vermicular a fost stabilită la I.C.S.I.T.-P.S.C., bazată pe corectarea formei grafitului prin postmodificare [378...381].

Pentru modificare sînt utilizate prealiaje din sistemul FeSiCaTiAlMgCe, cu compoziția prezentată în tabelul 2.12.

Tabelul 2.12

MODIFICATORI FeSiCaTiMgAlCe PENTRU OBȚINEREA Fgv [378]

Simbol	Compoziția chimică, %							
	Si	Ca	Ti	Al	Mg	MM	Ba	Fe
VM 11	51,2	1,6	8,9	2,2	4,04	0,3	0,4	Rest
VM 12	48,0	3,2	9,0	2,5	4,8	0,3	0,5	Rest
VM 13	38,1	2,1	10,7	6,4	4,2	0,3	—	Rest

Modificarea fontelor cu 1,1% modificatori VM și postmodificarea cu FeSi75, FeSiTi (VM8) și FeSiMg (VM7) determină schimbări importante în ceea ce privește forma grafitului (K_f) (tabelul 2.13). Fontele au fost elaborate în cuptoare cu inducție cu căptușeală acidă, de medie frecvență (2500 Hz), cu capacitatea de 70 kg. Încărcătura cuptorului a constat din fontă de înaltă puritate (F.Î.P.). și deșeuri de oțel. Modificarea a avut loc la 1540...1550°C. Corectarea formei grafitului are loc în două direcții: micșorarea capacității de nodulizare prin adaos de FeSiTi (VM8) și creșterea gradului de compactitate, prin adaos de FeSiMg (VM7).

Pentru determinarea formei grafitului, după tratarea fontei cu FeSiCaTiAlMgCe, este realizată analiza termică, trasîndu-se de-

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.1[3]

CARACTERISTICILE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR, MODIFICATE CU FeSiCaTiMgAlCe [378]

Proba	Postmodificare cu	Compoziția chimică, %								Caracteristici			Structura	
		C	Si	Mn	P	S	Mg	Ti	Al	R_m N/mm²	A %	HB	K_f**)	F, %
75.2	0,5% VM8*)		3,05			0,012	0,031	0,083		362	1,2	179	6	78
75.3	0,5% FeSi75	3,14	3,09	0,17	0,012	0,014	ND	0,079	0,018	397	2,6	170	6,5	90
75.4	0,5% VM7*)		3,03			0,014	0,049	0,079		393	3,0	170	7	90
76.2	0,5% VM8		2,89			0,017	ND	0,079		370	0,6	179	5	65
76.3	0,5% FeSi75	3,16	3,08	0,25	0,037	0,017	ND	0,080	0,018	385	2,8	170	6	86
76.4	0,5% VM7		3,03			0,014	ND	0,090		392	2,9	183	6,5	86
77.2	0,5% VM8		2,92			0,012	ND	0,090		369	0,4	170	5	69
77.3	0,5% FeSi75	3,17	3,03	0,26	0,037	0,012	ND	0,080	0,018	409	4,2	179	6	81
77.4	0,5% VM7		2,90			0,011	ND	0,050		422	4,7	183	6,5	78
78.2	0,5% VM8		3,12			0,012	0,034	0,12		445	5,4	179	6	90
78.3	0,5% FeSi75	3,23	3,27	0,27	0,038	0,012	ND	0,11	0,018	434	4,0	179	6	100
78.4	0,5% VM7		3,23			0,011	0,044	0,11		445	6,1	179	7	100
79.2	0,5% VM8		2,84			0,015	ND	0,12		366	1,6	207	5	73
79.3	0,5% FeSi75	3,27	3,04	0,29	0,038	0,015	ND	0,10	0,025	396	2,3	187	5,5	78
79.4	0,5% VM7		2,91			0,014	ND	0,10		396	2,7	192	5,5	78
80.2	0,5% VM8		2,73			0,015	ND	0,11		362	0,5	218	5	69
80.3	0,5% FeSi75	3,30	2,90	0,35	0,036	0,014	ND	0,07	0,03	393	2,3	187	5,5	81
80.4	0,5% VM7		2,83			0,013	ND	0,07		420	3,5	197	6	78

ND — nedeterminat
*) VM8 — FeSiTi; VM7 — FeSiMg
**) K_f = 5...6 (Gv); K_f = 7...8 (Gn)

Scanned with OKEN Scanner

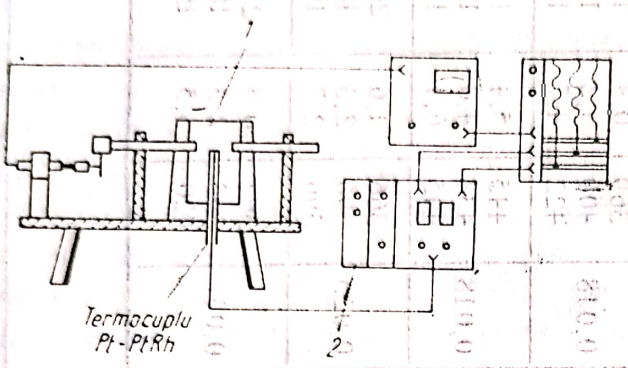


Fig. 2.32. Instalație pentru efectuarea analizei termice a fontelor [378]:

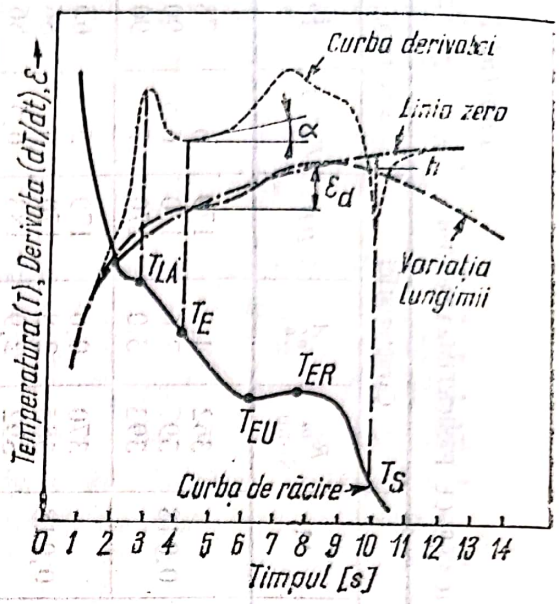


Fig. 2.33. Curbele de răcire $dT = f(t)$, derivata curbei de răcire $dT/dt = f(t)$ și variația lungimii probei $\varepsilon = f(t)$, pentru fonta cu grafit vermicular [378].

rivata curbei de răcire, cu ajutorul instalației prezentate în fig. 2.32, care măsoară și variațiile dimensionale ale probelor.

În fig. 2.33 sînt prezentate concomitent curbele de răcire $T = f(t)$, derivata curbei de răcire $dT/dt = f(t)$ și curba de variație a lungimii probei $\varepsilon = f(t)$.

Pe curba de răcire au fost fixate punctele principale (v. și § 2.62): T_{LA} = temperatura lichidus; T_E — temperatura începutului cristalizării eutectice; T_{Eu} — temperatura subrăcirii eutectice; T_{ER} — temperatura eutectică maximă; T_s — temperatura solidus.

Pe derivata curbei de răcire se determină unghiul α, la care începe cristalizarea eutectică, în timp ce pe curba de variație dimensională mărimea ε_d, care reprezintă dilatarea maximă. În tabelul 2.14 sînt prezentate rezultatele prvind corelația între caracteristicile celor trei curbe și structura fontei.

Creșterea carbonului echivalent în limitele 3,45...3,85% explică valorile diferite pentru temperatura lichidus (T_{LA}). Temperatura începutului cristalizării eutectice (T_E) nu prezintă variații semnificative. Se remarcă faptul că temperatura eutectică maximă (T_{ER}) și temperatura solidus (T_s) prezintă maximumuri în cazul grafitului vermicular ($K_f = 5...6$). Aceste maximumuri sînt: $T_{ER} = 1145...1150$°C și $T_s = 1080...1090$°C. Mărimea unghiului α este în strînsă legătură cu căldura degajată în unitatea de timp la cristalizarea eutectică. Valorile maxime $\alpha = 42...50°$ caracterizează apariția grafitului vermicular.

Tabelul 2.14

CARACTERISTICILE CURBELOR DE RĂCIRE ȘI STRUCTURA FONTELOR [378]

Numărul topiturii	Carbon echivalent %	Curba de răcire					Derivata curbei de răcire		Dilatarea maximă	Structura	
		T_{LA}	T_E	T_{EU}	T_{ER}	T_S	$\alpha°$	h	ε_d	K_f*)	F,%
84	3,58	1226	1185	1130	1136	1073	17	9,2	5,5	1,0	5
74	3,45	1252	1205	1133	1333	1078	28	17,5	ND	3,0	23
75	3,67	1215	1185	1150	1150	1094	41	8,5	4,5	4,5	69
77	3,68	1213	1183	1143	1146	1080	52	7,0	8,0	6,5	57
83	3,74	1206	1182	1133	1133	1072	56	4,5	9,0	7,0	52
85	3,85	1193	1192	1112	1112	1036	56	0,5	22,5	8,0	16

*) $K_f = 1...4$ (Gl); $K_f = 5...6$ (Gv); $K_f = 7...8$ (Gn)

Dependența parametrilor curbelor prezentate în fig. 2.33 în funcție de factorul de formă al grafitului (K_f) este urmărită în fig. 2.34.

În ceea ce privește dilatarea maximă ε_d, aceasta prezintă valori de 5,10—6 pentru Fgl, 5...9 pentru Fgv și 10...20 pentru Fgn.

Tehnologia elaborată la I.C.S.I.T.-P.S.C. București este prezentată schematic în fig. 2.35.

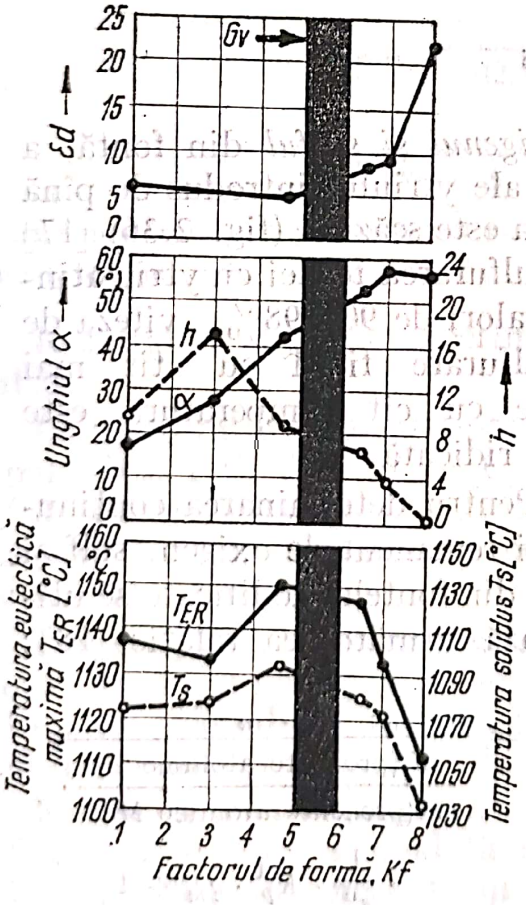


Fig. 2.34. Influența factorului de formă a grafitului (K_f) asupra parametrilor curbelor prezentate în fig. 2.33 [378].

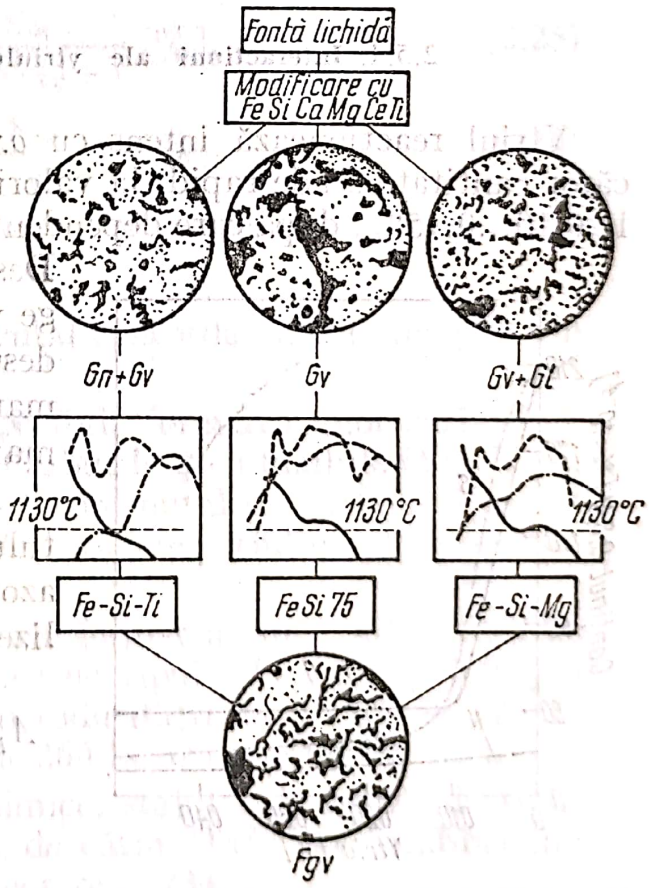


Fig. 2.35. Tehnologia ICSITPSC București de obținere a Fgv [381].

Un interesant procedeu de obținere a fontelor cu grafit vermicular prin modificarea cu Mg-Ti-PR este cel la care se utilizează brichete presate la 5000 daN/cm², cu 4,3 g/cm³, ce conțin 1...10% Mg, 1...20% Ti, 0,5...4% PR, 0,1...10% Ca, Fe-rest. De exemplu, pentru obținerea acestor brichete se utilizează: 68% burete de fier, 5% Mg, 9,5% Ti, 0,5% floruri de PR, 17% SiCa, 2% rășină fenol-formaldehidică. O fontă cu 3,5% C și 2% Si se modifică cu 1,5% brichete și 0,5% FeSi (patent Anglia nr. 8035515/8.07.1981).

Conferința internațională privind fonta cu grafit nodular (octombrie 1975, S.U.A.) remarcă perspectivele dezvoltării producției pe fontă cu grafit vermicular prin modificarea cu Mg-Ti-Ce, precum și rolul elementelor de aliere în îmbunătățirea proprietăților [121]. Concluzii similare se remarcă și la "1978 IBF Conference" în Marea Britanie [142] precum și în S.U.A. [241].

2.5. Utilizarea ytriului la obținerea fontelor cu grafit vermicular

2.5.1. Interacțiuni ale ytriului

Ytriul reacționează intens cu *oxigenul și sulful* din fontă, a căror cantitate scade rapid, la valori ale ytriului introdus de pînă la 0,10...0,15%, după care dependența este scăzută (fig. 2.36) [17]

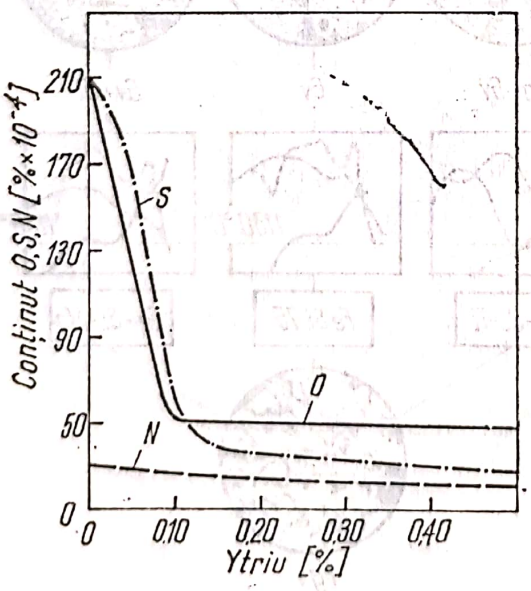


Fig. 2.36. Influența ytriului asupra conținutului de oxigen, sulf și azot al fontei [17].

Desulfurarea fontei cu ytriu atinge valori de 90...98%, viteza de desulfurare fiind cu atît mai mare cu cît temperatura este mai ridicată.

Pentru determinarea conținutului remanent de oxigen, sulf și azot din fontele modificate se utilizează următoarea relație [18]:

$$A_K = \frac{A_{in}}{\frac{Y\ (\text{procente atomice } A)}{Y\ (\text{procente atomice Me})} \cdot \frac{1}{A_K^0} \cdot K_p^A \cdot q_m + 1} \qquad (2.22)$$

Scanned with OKEN Scanner

în care: x, y sînt indicii din compușii Me_xA_y; Me — simbolul elementului modificator; A — simbolul elementului înlăturat (O, S, N); A_{in} — conținutul inițial de O, S, N, în %; A_K^0 — conținutul remanent de O, S, N, în %; ($A_K^0 \leqslant 0{,}005\%$ pentru O și S; $A_K^0 < 0{,}001\%$ pentru N); q_m — cantitatea de modificator utilizat, în %; K_p^A — coeficientul parțial de consum al modificatorului cu componentul A din fontă (O, S, N).

Coeficientul K_p^A se calculează cu relația:

$$K_p^A = \frac{\Delta Z^{Me_xA_y}}{\Delta Z^{Me_{\alpha_1}O_{\beta_1}} + \Delta Z^{Me_{\alpha_2}S_{\beta_2}} + \Delta Z^{Me_{\alpha_3}N_{\beta_3}}}, \qquad (2.23)$$

în care numitorul reprezintă potențialele termodinamice izobare de formare a compușilor respectivi.

În cazul modificării cu ytriu, la 1700°K, au fost stabilite următoarele relații pentru calculul conținuturilor remanente de O, S, N:

$$O_{rem} = \frac{O_{in}}{29{,}91 \cdot q_y + 1}\ [\%], \qquad (2.24)$$

$$S_{rem} = \frac{S_{in}}{12{,}26 \cdot q_y + 1}\ [\%], \qquad (2.25)$$

$$N_{rem} = \frac{N_{in}}{8{,}33 \cdot q_y + 1}\ [\%], \qquad (2.26)$$

în care numărătorul reprezintă conținuturile inițiale de O, S și N, iar numitorul cantitatea de ytriu adăugat, în %.

Rezultatele obținute experimental concordă cu cele reieșite din calcul.

La temperaturi ridicate este posibilă formarea unor carburi de tipul: YC_2, Y_3C, Y_2C, YC, Y_2C_3. Carburile greu fuzibile (YC, Y_2C_3, YC_2), pot trece în zgură, astfel că conținutul de carbon al fontei scade cu 4...10%. Din acest punct de vedere ytriul nu se deosebește de Ce, Mg, Ca [17].

Pentru ytriu este caracteristică formarea unor soluții solide (max. 1%Y) și combinații chimice de tipul YFe_2, YFe_3, YFe_4 și YFe_9, care determină mărirea microdurității feritei (de la 125 la 150 daN/mm²) și a perlitei (de la 260 la 325 daN/mm²) [17].

Formarea unor combinații chimice, stabile, cu fierul, de tipul YFe_2 și YFe_9 este semnalată și de către [148] iar combinațiile YFe_4 și YFe_9 sînt prezente în lucrarea [234].

Există posibilitatea formării unor compuși cu fosforul, de tipul Y_xP_y [17].

Scanned with OKEN Scanner

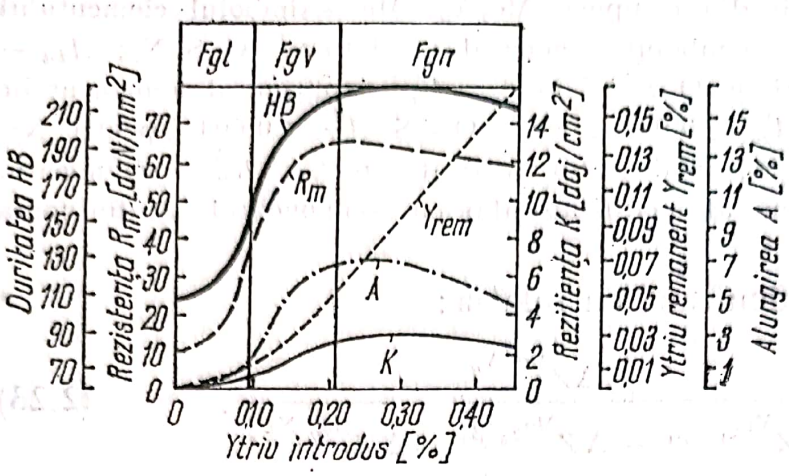


Fig. 2.37. Influența ytriului asupra proprietăților fontelor în cazul postmodificării cu 1% FeSi75 [14].

2.5.2. Modificarea fontei cu ytriu metalic

În cazul unor fonte cu 2,43...4,0% C, 1,0... 2,9% Si, 0,25... 0,8% Mn, 0,02...0,04% S, adaosuri de ytriu, la 1430°C, în cuptorul cu inducție determină obținerea diferitelor forme de grafit, atunci cînd nu se utilizează postmodificarea: pînă la 0,1% ytriul are o acțiune grafitizantă, la 0,1...0,20% determină formarea grafitului vermicular, în timp ce la 0,2...0,3% Y apare grafitul nodular, dar masa metalică conține ledeburită, iar la peste 0,35% Y apare fenomenul de denodulizare a grafitului [14].

Conținutul remanent de ytriu, necesar pentru obținerea grafitului vermicular este de 0,02...0,04%, recomandîndu-se o postmodificare cu 1% FeSi75 (fig. 2.37).

Se recomandă ca modificarea fontelor cu ytriu să aibă loc la temperaturi cuprinse în intervalul 1420...1450°C. La temperaturi sub 1420°C difuzia este limitată, în timp ce la peste 1450°C crește consumul de modificator.

În S.U.A. a fost analizat potențialul utilizării ytriului, din diferite surse, la modificarea fontelor [264]. La adaosuri scăzute, ytriul conduce la formarea grafitului vermicular, în timp ce în cantități mai mari, se formează grafitul nodular, fontele fiind caracterizate prin porozitate la un exces de ytriu. La fontele cu sulf scăzut, pentru a obține grafit nodular, se recomandă 0,10...0,15% Y sub aceste valori formîndu-se grafit vermicular.

2.5.3. Utilizarea pămînturilor rare cu Ytriu

Cercetări ample în direcția obținerii fontelor cu grafit vermicular prin modificarea cu elemente din grupa pămînturilor rare cu ytriu se desfășoară în U.R.S.S.

Scanned with OKEN Scanner

Analizînd posibilitatea utilizării, la modificarea fontelor, a silicolantanului (SiLa), silicomischmetallului (Si-MM) și a silicomischmetallului cu Ytriu (Si-Y-MM), se constată că cele mai bune rezultate se obțin în cazul folosirii Si-Y-MM, al cărui consum este de 1,5 ori mai mic decît în cazul folosirii Si-MM și de 2,0 ori față de utilizarea SiLa. Astfel, la o compoziție chimică de bază, cu 3,44...3,80% C, 1,5...2,6% Si, 0,30% Mn, 0,03% S și 0,025% P, se realizează fonte cu grafit vermicular la modificarea cu 1,25%Si-La, 0,75% Si-MM sau 0,5% Si-Y-MM (44,5% Si, 4,4% Al, 1,6% Ca, 29,5% PR din care: 12,6% Ce, 2,5% La, 2,9% Nd, 1,5% Pr și 5,6% Y) [287].

În mai multe lucrări, se stabilesc parametrii tehnologiei de obținere a fontelor cu grafit vermicular, prin modificarea cu Si-Y-MM [2,6...8, 197, 287...290].

În cazul unor fonte cu $S_c = 0,92...1,03$, turnate în forme din amestec de formare (viteza de răcire 60°C/min), se obține grafit vermicular la un conținut de 0,11...0,14% PR remanente, modificarea avînd loc în cuptor la 1350...1400°C. Se obțin următoarele caracteristici ale fontelor cu grafit vermicular, în stare turnată: $R_m = 370...460$ N/mm², $A = 2...4\%$, $K = 1,5...3,0$ daj/cm² și 156...161 *HB*. Efectul modificator a fost păstrat timp de 20 min [288].

Variind compoziția chimică a fontelor în limitele 2,5...4,5%C, 0,3...3,5% Si, 0,3% Mn, S și P sub 0,04%, s-au stabilit o serie de diagrame structurale, în cazul modificării cu 0,7...1,0% modificatori Si-Y-MM (30% PR), prezentate în fig. 2.38 [289].

Influența conținutului de sulf al fontei, a cantității de modificator și a temperaturii fontei la modificare asupra structurii și proprietăților fontelor sînt analizate în lucrarea [6].

Fontele supuse modificării au prezentat următoarea compoziție chimică: 3,0...4,0%C, 1,5...2,5%Si, 0,2...1,0% Mn, max.0,08%P și 0,005...0,03%S.

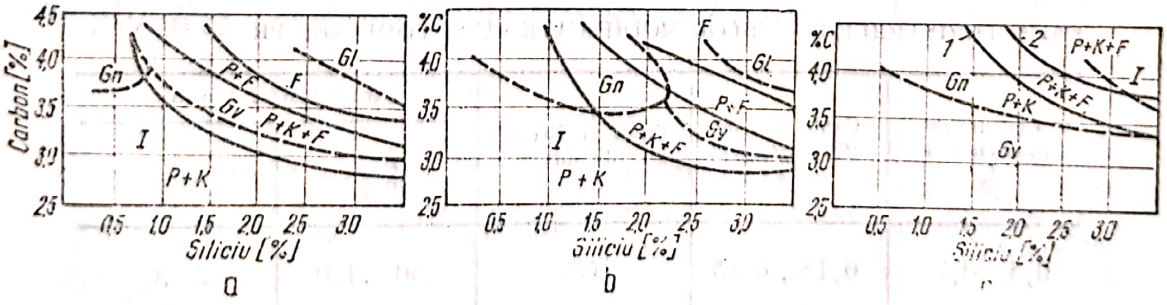


Fig. 2.38. Diagramele structurale ale fontelor modificate cu Ce-Y-Si-MM [289]:
a — 0,7% Ce-Y-SiMM; 60°C/min (forme amestec); *b* — 1,0% Ce-Y-SiMM; 60°C/min (forme amestec); *c* — 1,0% Ce-Y-SiMM; 140°C/min (forme metalice);
1 — 0,7% Mod; *2* — 1,0%, Mod. *I* — grafit punctiform + vermicular (liniile pline delimitează domeniile masei metalice iar cele punctate pe ale grafitului)

Scanned with OKEN Scanner

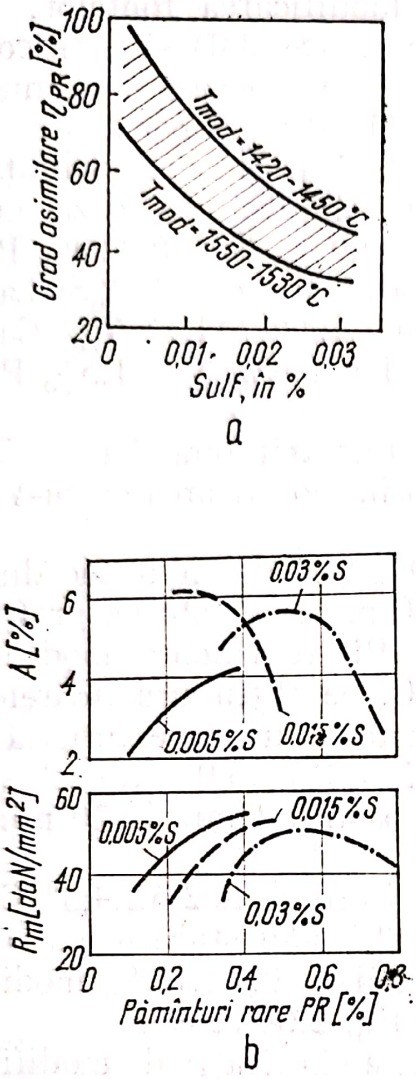


Fig. 2.39. Gradul de asimilare la modificare (*a*) și proprietățile fontelor (*b*) [6].

Modificarea fontelor a avut loc la temperaturi cuprinse în limitele 1350...1600°C, cu 0,5...3,0% modificator, postmodificarea avînd loc cu 0,5...1,0% FeSi75.

Pentru modificarea în oală se recomandă temperaturi de 1430...1480°C, în timp ce la modificarea în cuptor valori de 1380...1430°C.

Gradul de asimilare al elementelor din grupa pămînturilor rare (η_{PR}) este direct determinat de către conținutul de sulf al fontei, ca și de temperatura de modificare (fig. 2.39).

Utilizînd modificatori cu 30% PR, la un conținut de 4...5% Y, au fost obținute rezultatele prezentate în tabelul 2.15.

Influența cantității de elemente din grupa pămînturilor rare introduse în fontă și a conținutului de sulf asupra proprietăților sînt prezentate în fig. 2.39, *b*.

Caracteristicile maxime au fost obținute la valori de 0,35...0,50% PR, cînd se asigură formarea grafitului nodular. La valori sub 0,35% PR fonta conține grafit vermicular, în timp ce la >0,50 % PR apare cementita liberă.

Tabelul 2.15

CARACTERISTICILE FONTELOR MODIFICATE CU Si-YiMM (30% PR; 4—5% Y) [6]

Consum de modificator %	Cantitatea de PR introduse, %	Tipul grafitului obținut	Caracteristici mecanice	
			R_m N/mm²	A %
0,5...0,7	0,15...0,25	Gv	330...420	2...6
0,8...1,0	0,25...0,3	Gv + Gn (≤50% Gn)	420...500	3...6
1,2...1,5	0,35...0,45	80...85% Gn	500...600	2...9
>1,5	>0,45	Gn	—	—

Scanned with OKEN Scanner

Avînd în vedere costul ridicat al acestor modificatori (3 ruble/kg), utilizarea acestora se recomandă numai în condițiile în care fonta conține sub 0,03%S.

În cazul utilizării a 1% Si-Y-MM, temperatura la care are loc modificarea fontei și durata de menținere după modificare schimbă în mare măsură forma grafitului [290]. Astfel, modificări la temperatura de 1300...1400°C asigură obținerea grafitului nodular, în timp ce introducerea aceleași cantități de modificator într-o fontă la 1500°C determină micșorarea cantității remanente de pămînturi rare (0,12%), ceea ce asigură formarea grafitului vermicular. Durate de menținere ale fontei de pînă la 20 min nu schimbă forma grafitului.

Rezultate similare sînt prezentate și în cadrul lucrării [2], în care se arată că, modificarea poate avea loc în cuptor, la 1350... ...1400°C, în oală la 1430...1480°C sau în jetul de fontă lichidă. Consumul de modificator depinde de temperatura de modificare și conținutul de sulf al fontei (fig. 2.40), impunîndu-se conținuturi remanente de 0,10...0,15% $(PR)_{rem}$, din care 0,02...0,06% Ce_{rem}. Pentru fontele cu 0,015...0,03%S se recomandă 0,7...0,9% modificator, care poate fi micșorat cu 15...20% în cazul pieselor cu pereți subțiri (max 20 mm). În cazul fontelor de cubilou (0,08...0,10% S) este necesar 2...2,5% modificator, dar se recomandă o desulfurare prealabilă, avînd în vedere costul ridicat al acestor modificatori.

Postmodificarea se realizează cu FeSi75, a cărui cantitate este determinată de carbonul echivalent al fontei. O eficacitate sporită se obține în cazul în care postmodificarea are loc în formă [2].

Consumul de modificator poate fi micșorat în cazul în care fontele, înainte de modificare, sînt puternic desulfurate. Astfel, fonte cu $S_c = 1,1$, elaborate în cuptoare cu căptușeală neutră, sînt desulfurate cu CaC_2, introdusă în cuptor la 1450...1500°C. După o perioadă de 10 min se realizează un grad de desfulfurare de 83... ...89%, astfel că fonte cu grafit vermicular pot fi obținute la 0,3% modificator (31,5% PR, 47,6% Si, 4,9% Al, rest Fe) [151].

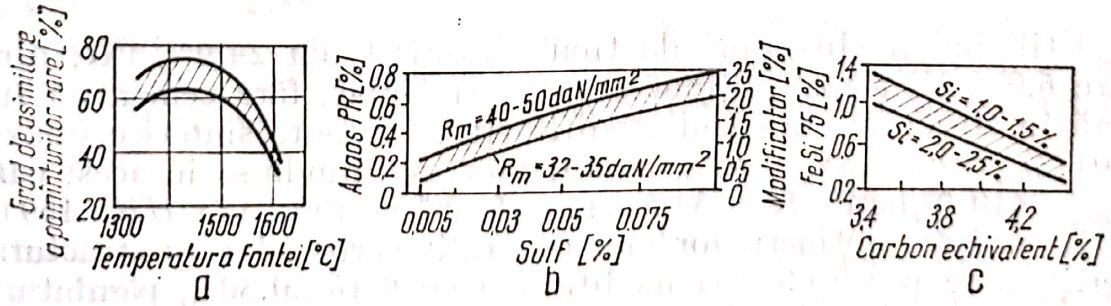


Fig. 2.40. Influența temperaturii (*a*) și sulfului (*b*) asupra gradului de asimilare și necesarului de postmodificator (*c*) [2].

Acești modificatori, cunoscuți sub denumirea de *Siitmiș-1*" prezintă o serie de avantaje față de alte materiale utilizate pentru obținerea fontelor cu grafit vermicular [8]:

— modificarea decurge fără efect piroforic, iar gradul de poluare este redus;

— modificatorul poate fi adăugat în cuptor, în oală sau în jet de fontă;

— asimilarea modificatorului se realizează ușor, într-o gamă largă de temperaturi ale fontei (1300...1500°C);

— nu sînt necesare măsuri speciale de păstrare și pregătire a modificatorului;

— nu este higroscopic, astfel că poate fi menținut timp îndelungat în stare sfărîmată.

În cazul unor modificatori cu 38,0...46%Si, 3,0...5,0%Ca și 22...26% PR, variația cantității de Ce și Y influențează în mare măsură forma grafitului. Fontele, cu 3,4...3,6% C, 2,0...2 2%Si, 0,2...0,4% Mn, max.0,2% P, max. 0,03% S, au fost supraîncălzite la 1455°C și modificate la 1355°C. Postmodificareaa fost realizată cu 0,6% FeSi75. Rezultatele obținute sînt prezentate în tabelul 2.16 [167]. În cazul fontelor elaborate în cubilou cu cocs și gaz metan, cu aer rece, cu 3,4...3,6%C, 1,8...2,0%Si, 0,7...0,9% Mn, 0,13...0,15%P, 0,10...0,11%S, utilizarea a 1,0...1,5% modificatori (M_1 și M_2, tabelul 2.16), la 1340...1360°C a condus la obținerea a 60...70%Gv și 40...30% Gn, masa metalică de bază conținînd 25...30% F.

Tabelul 2.16

UTILIZAREA MODIFICATORILOR CU Y și Ce [167]

Modificator	Pămînturi rare (PR), în %			Structura			Proprietăți	
	Total	Ce	Y	Gn %	Gv %	P %	R_m N/mm²	A %
1,0% M_1	22,0	0,2	11,9	28...30	70...72	15...17	360	4,8
1,5% M_2	23,0	12,75	3,9	40	60	60	380	5,8

Utilizînd modificatori de tipul Siitmiș-1, cu 24,9% PR, din care 6,0% Y, a fost obținut grafit vermicular, fără cementită liberă în structură, în cazul modificării unor fonte sintetice (max. 0,017% S) cu 0,35...0,45% modificator, obținîndu-se în acest caz $R_m = 410$ N/mm², $K = 34,5...44,0$ J/cm² și 160...185 *HB* [169].

În vederea obținerii fontelor cu grafit vermicular cu structură perlitică se poate efectua modificarea cu 0,16...0,30% pămînturi rare cu ytriu și postmodificarea cu 0,1...0,3% material grafitizant, cu 1..20% Si (patent U.R.S.S. Nr 2458207/15.05.1981).

Scanned with OKEN Scanner

2.6. Controlul gradului de modificare

Calitatea fontelor cu grafit vermicular este influențată de un mare număr de factori, legați de compoziția fontei și agregatul de elaborare, materialele utilizate în încărcătură, modificatorul și tehnologia de modificare, condițiile de solidificare etc.

Urmărind producerea unor fonte cu grafit vermicular, la care să nu apară grafit lamelar iar cel nodular să nu depășească 30%, este luată în considerare influența mai multor factori posibili să varieze în producția acestui tip de fontă: tipul și cantitatea de modificator, conținutul de sulf, temperatura de modificare, carbonul echivalent și postmodificatorul [433].

Efectuînd o analiză asistată de calculator, s-a constatat că efectul schimbării tipului de modificator este minim dar mărirea conținutului de sulf al fontei conduce la creșterea consumului de modificator și al incertitudinii obținerii grafitului vermicular.

Nodularitatea se schimbă cu 5...10% pentru fiecare 1,5 kg modificator și cu 5% pentru fiecare 30°C. De asemenea, nodularitatea se schimbă funcție de carbonul echivalent, cantitatea de postmodificator și grosimea de perete a pieselor turnate. Avînd în vedere multitudinea de factori care influențează stabilitatea efectului modificator se impune un control riguros al gradului de modificare a fontei.

2.6.1. Controlul cu ultrasunete

Controlul cu ultrasunete constituie o metodă nedistructivă de punere în evidență a formei grafitului, datorită existenței unei legături directe între viteza de propagare a sunetului și forma grafitului.

În cadrul lucrării [189], au fost utilizate probe, în stare turnată cu dimensiunile 25 ×25 ×15 mm.

Dependența dintre tipul grafitului și viteza sunetului este prezentată în fig. 2.41. Se constată că mărirea gradului de compactitate a grafitului, respectiv trecerea de la o structură în care predomină grafitul lamelar (domeniul *I*) la structuri cu grafit vermicular (domeniul *II*) și nodular (domeniul *III*) determină mărirea vitezei sunetului.

În cadrul unei ample lucrări [275] este urmărită influența grafitului vermicular asupra vitezei transmiterii sunetului, în cazul unor fonte perlitice. Forma grafitului a fost schimbată (de la 90% Gn la 95% Gv) prin menținerea fontei modificate, înainte de turnare.

Scanned with OKEN Scanner

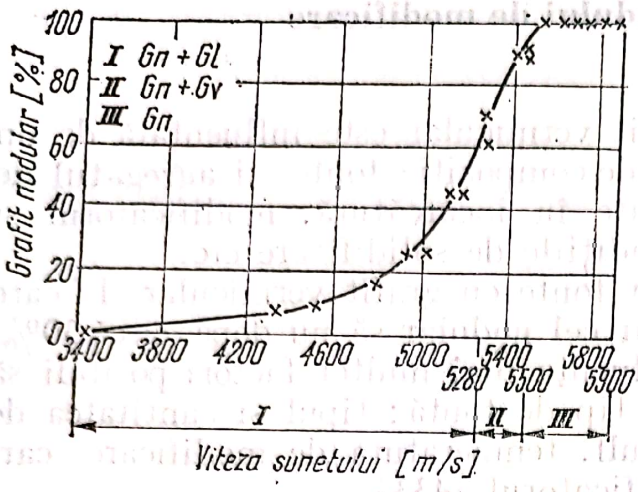


Fig. 2.41. Influența formei grafitului asupra vitezei sunetului [189].

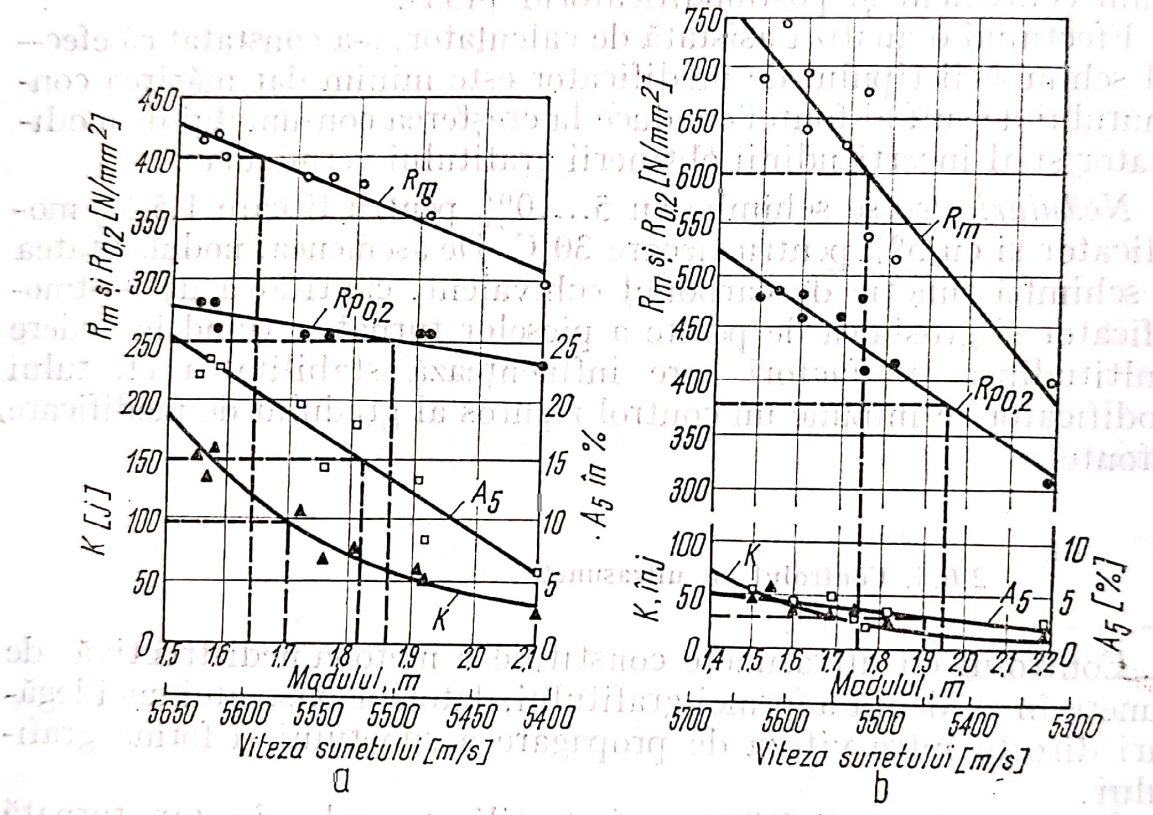


Fig. 2.42. Dependența caracteristicilor mecanice ale fontelor feritice (*a*) și perlitice (*b*) de ↓ viteza sunetului [275, 276].

În fig. 2.42 este prezentată variația caracteristicilor mecanice funcție de viteza sunetului.

Rezultă deci că la micșorarea vitezei sunetului, respectiv la trecerea de la grafitul nodular spre grafitul vermicular se înregistrează o scădere a valorilor caracteristicilor mecanice.

Considerînd cazurile extreme, respectiv fontele feritice cu grafit nodular și vermicular, se obțin datele prezentate în tabelul 2.17.

Valoarea vitezei sunetului, transmis printr-o probă (piesă) dată, permite deci stabilirea nu numai a caracteristicilor grafitului, dar dă informații utile și în ceea ce privesc proprietățile mecanice ale fontelor.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.17

CARACTERISTICILE FONTELOR FERITICE CU GRAFIT VERMICULAR ȘI NODULAR [275]

Tipul fontei	Tipul grafitului	Viteza sunetului m/s	Rezistența la rupere R_m N/mm²	Alungirea A_5 %	Limita de curgere $R_{0,2}$ N/mm²	Modulul de elasticitate E kN/mm²
Fgv	5% M 95% P	5322	295	5,6	229	156
Fgn	90% K 10% L	5599	400	22,8	261	163

Această metodă de control permite stabilirea unor valori minime, de siguranță, ale vitezei sunetului, pentru a se asigura obținerea fontelor cu caracteristicile impuse.

Creșterea ponderii grafitului vermicular în structura fontelor cu grafit nodular determină micșorarea valorii vitezei sunetului prin piesa dată, situație care corespunde și cu scăderea caracteristicilor mecanice (tabelul 2.18).

Tabelul 2.18

INFLUENȚA GRAFITULUI VERMICULAR ASUPRA VITEZEI SUNETULUI [133]

Grafit vermicular %	Viteza sunetului m/s	Rezistența la tracțiune R_m N/mm²	Limita de curgere $R_{p_{0,2}}$ N/mm²	Alungirea A_5 %	Duritatea HB
10	5563	648	429	8	197
20	5512	625	411	7	201
60	5436	479	361	5,5	179
85	5309	377	330	2,5	173

Valoarea vitezei sunetului depinde nu numai de tipul grafitului, dar și de gradul său de compactitate, pentru fiecare tip.

Fontele cu grafit vermicular (5100...5400 m/s) ocupă o poziție intermediară între cele cu grafit lamelar (3400...4600 m/s) și nodular (5500...5800 m/s), în ceea ce privește viteza de transmitere a sunetului.

Domeniul de variație în cazul fiecărei fonte este determinat de schimbarea gradului de compactitate a grafitului.

Datorită structurii sale eterogene, fonta prezintă o serie de inconveniente în cazul folosirii vitezei de propagare a sunetului ca

Scanned with OKEN Scanner

parametru caracteristic: apar fenomene de reflexie și refracție, undele sînt longitudinale și transversale etc.

Avînd în vedere aceste considerente, în lucrarea [426] se propun alți parametrii pentru determinarea caracteristicilor fontelor.

Un prim parametru îl constituie *coeficientul de propagare* λ_c, el reprezentînd viteza relativă de propagare a undei în fontă, în raport cu viteza de propagare a acesteia în oțel.

Coeficientul de propagare poate fi calculat cu relația:

$$\lambda_c = \frac{e_r}{e_a} \tag{2.27}$$

în care: e_r este grosimea reală a secțiunii piesei, măsurată cu micrometrul; e_a — grosimea aparentă a secțiunii piesei, determinată cu ajutorul echipamentului ultrasonic, după măsurarea pe oțel.

Coeficientul de propagare λ_c este măsurat cu patru echipamente ultrasonice diferite, două digitale și două cu ecran, frecvențele de lucru fiind de 4,5,6 și 10 MHz.

Coeficientul de propagare depinde de eterogenitatea structurii și în special de caracteristicile grafitului.

Ca material de comparație este utilizat de regulă oțelul recopt cu structură feritică.

Amplitudinea unei unde care traversează un mediu se diminuează progresiv, datorită absorbției. Această absorbție depinde de numărul de reflexii care au loc la parcurgerea unui mediu eterogen constituit din mai multe faze, diferite ca natură și geometrie.

Absorbția poate fi definită prin doi parametri. Primul este:

$$\lambda_a = \frac{H_1 - H_2}{2\,e}, \tag{2.28}$$

în care: λ_a este coeficientul de absorbție; H_1, H_2 — înălțimile primului și celui de al doilea ecou de fund în mm; e — grosimea piesei controlate, în mm.

Al doilea parametru poate fi definit cu relația:

$$\alpha = \frac{H_1 - H_2}{2\,d}, \tag{2.29}$$

în care: α ste absorbția, în dB/mm; H_1, H_2 — decibelii necesari pentru a situa primul și cel de al doilea ecou de fund la o înălțime 4/5 pe ecran, în dB; d — grosimea piesei controlate, în mm.

Coeficientul de absobție λ_a și absorbția α au fost măsurate cu un echipament ultrasonic cu ecran TRC și palpator cu frecvența 4 MHz.

Scanned with OKEN Scanner

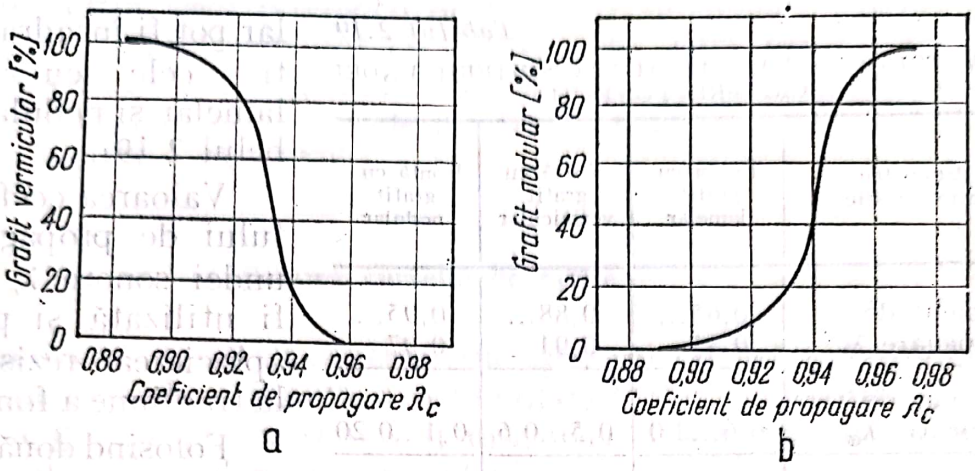


Fig. 2.43. Dependența valorii coeficientului de propagare a undei sonore de proporția de grafit vermicular (*a*) și nodular (*b*) [426].

Utilizînd acești parametri, în lucrarea [426] se pune în evidență dependența lor de caracteristicile grafitului.

Variind proporția de grafit vermicular și nodular în limitele 0...100% (Gv + Gn = 100%), au fost obținute dependențele între coeficientul de propagare λ_c și proporția de grafit vermicular (fig. 2.43, *a*) și nodular (fig. 2.43, *b*). Rezultă deci că valoarea coeficientului de propagare a undei sonore crește sub acțiunea grafitului nodular și scade odată cu mărirea proporției de grafit vermicular.

Mărirea proporției de grafit vermicular în structura fontelor determină creșterea valorii absorbției undei sonore (α — fig. 2.44,*a*) și cea a coeficientului de absorbție (λ_a — fig. 2.44, *b*).

Luînd în considerare coeficientul de propagare (λ_c), coeficientul de absorbție (λ_a) și valoarea absorbției (α), fontele cu grafit vermicu-

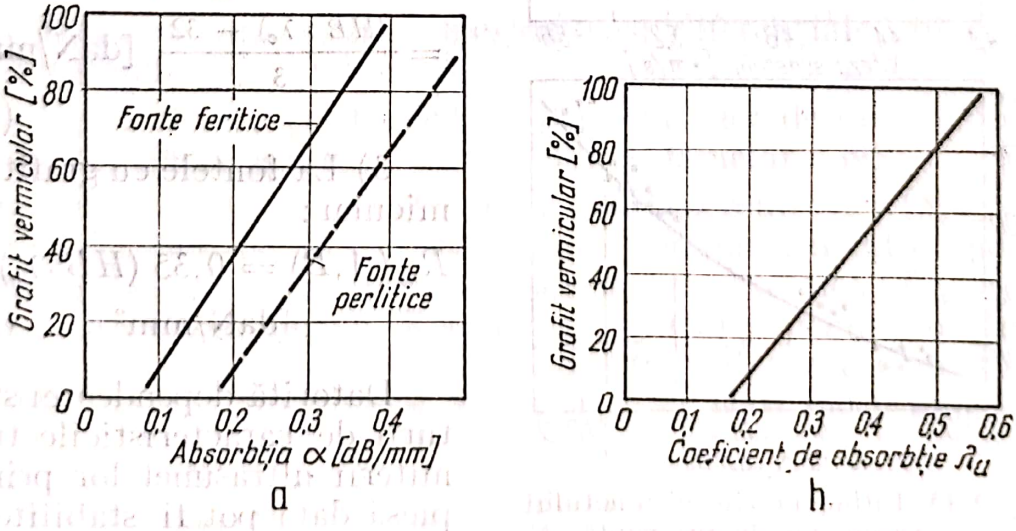


Fig. 2.44. Ponderea grafitului vermicular funcție de valoarea absorbției (*a*) și coeficientului de absorbție (*b*) [426].

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.19

PARAMETRI CARACTERISTICI AI TRANSMITERII UNDEI SONORE PRIN FONTĂ [426]

Parametru caracteristic	Fontă cu grafit lamelar	Fontă cu grafit vermicular	Fontă cu grafit nodular
Coeficient de propagare λ_c	0,65... 0,85	0,88... 0,91	0,95... 0,97
Coeficient de absorbție λ_a	0,6...2,0	0,5...0,6	0,1...0,20
Absorbția α, în dB/mm	0,4...1,0	0,35... 0,50	0,1...0,20

lar pot fi încadrate între cele cu grafit lamelar și nodular (tabelul 2.19).

Valoarea coeficientului de propagare a undei sonore λ_c poate fi utilizată și pentru aprecierea rezistenței la tracțiune a fontelor.

Folosind două tipuri de epruvete pentru determinarea rezistenței la tracțiune și a analizei cu ultrasunete (A — ∅ 8 mm si B-∅ 120 mm) se obțin următoarele dependențe:

1) La fontele cu grafit lamelar:

$$R_m\,(A) = 0{,}23\,(HB \cdot \lambda_c) - 10 \quad [\text{daN/mm}^2], \tag{2.30}$$

$$R_m\,(B) = \frac{2\,(HB \cdot \lambda_c) - 100}{9} \quad [\text{daN/mm}^2]; \tag{2.31}$$

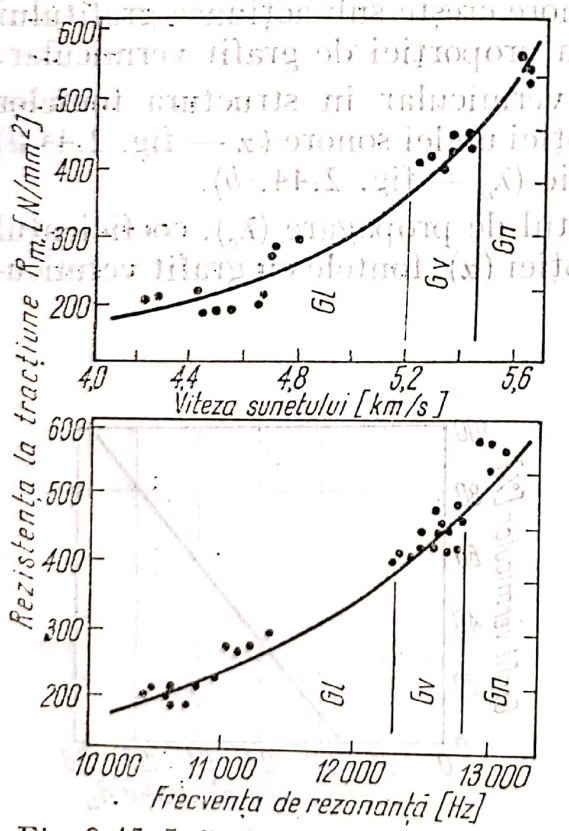


Fig. 2.45. Influența vitezei sunetului (*a*) și a frecvenței de rezonanță (*b*) asupra rezistenței fontelor cu diferite forme de grafit [333].

2) La fontele cu grafit nodular:

$$R_m\,(A) = \frac{(HB \cdot \lambda_c) - 20}{3} \quad [\text{daN/mm}^2], \tag{2.32}$$

$$R_m\,(B) = \frac{(HB \cdot \lambda_c) - 32}{3} \quad [\text{daN/mm}^2]; \tag{2.33}$$

3) La fontele cu grafit vermicular:

$$R_m\,(A,B) = 0{,}35\,(HB \cdot \lambda_c) - 15 \quad [\text{daN/mm}^2]. \tag{2.34}$$

Datorită dependenței structurii de caracteristicile transmiterii ultrasunetelor printr-o piesă dată pot fi stabilite direct caracteristicile mecanice (fig. 2.45) [333].

Scanned with OKEN Scanner

În cadrul unei producții de tambure de frînă, matrițe pentru forjă, se aplică controlul cu ultrasunete, care separă cu succes fontele cu grafit vermicular de cele cu grafit lamelar. Se apreciază că acest control este ușor de realizat, la un preț de cost scăzut și cu o mare precizie [278].

2.6.2. Utilizarea curbelor de răcire

Controlul calității fontelor cu ajutorul curbelor de răcire permite punerea în evidență a particularităților procesului de germinare a grafitului, creșterea și mărimea dendritelor de austenită, procesul de transformare eutectică.

Pentru studiul procesului de grafitizare trebuie să se țină seama de particularitățile cristalizării reale ale fontelor [242]:

— existența unei subrăciri eutectice, care depinde de compoziția chimică, viteza de răcire, prezența germenilor de cristalizare etc;

— schimbarea volumului de solidificare; la fontele din domeniul eutectic, cristalizarea eutectică are loc cu mărire de volum;

— separarea grafitului eutectic, a cărui cantitate variază în limite largi, ajungînd la zero la fontele albe;

— segregația elementelor poate determina schimbări structurale, în sensul apariției carburilor și a formelor degenerate de grafit.

Studiul cristalizării fontei se poate realiza în mai multe variante [27, 31, 66, 131, 242, 352, 395, 424]:

a) Trasarea curbelor de răcire în coordonatele temperatură (T) — timp (τ).

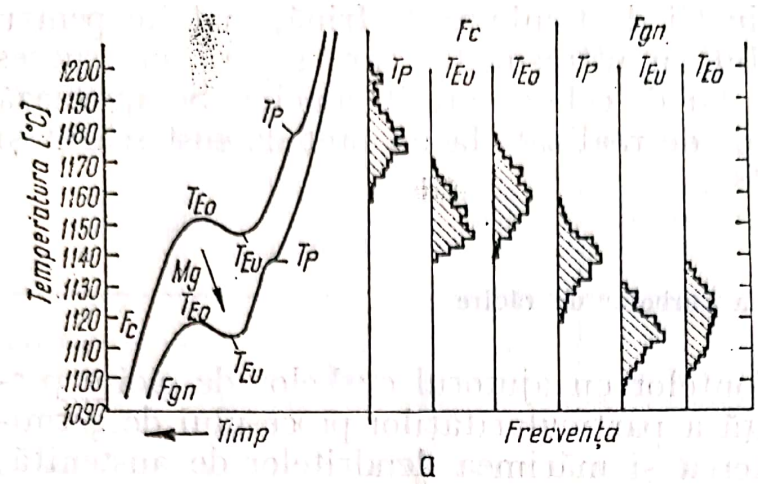
b) Obținerea curbelor de răcire în coordonatele ($dT/d\tau$ — τ).

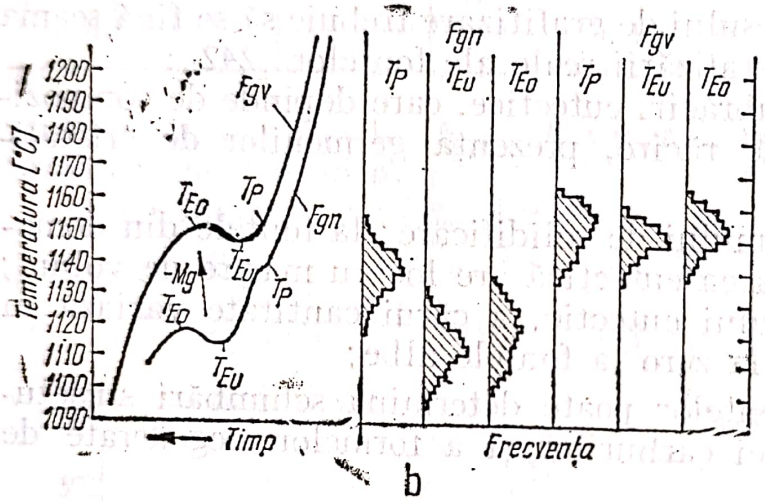
c) Trasarea unor curbe calorimetrice diferențiale, in coordonatele căldură (Q) — timp (τ).

În fig. 2.46 este prezentată schema curbelor de răcire în cazul fontelor cu grafit nodular, vermicular și lamelar [395].

Avînd în vedere faptul că fontele sînt hipereutectice ($S_c = 1{,}0$—$1{,}1$) pe curbele de răcire este pus în evidență momentul apariției grafitului primar (T_p), precum și subrăcirea eutectică ($T_{Eu} - T_{Eo}$). Se remarcă totuși faptul că apariția grafitului primar are loc cu perturbații energetice mici, motiv pentru care acest moment (T_p) este greu de pus în evidență. Pornind de la acest lucru unii autori remarcă faptul că dacă pe curbele de răcire punctul T_p este evident, atunci grafitul nodular are o formă regulată [27] sau chiar faptul că însăși apariția acestui punct este o dovadă a faptului că grafitul este nodular.

Scanned with OKEN Scanner





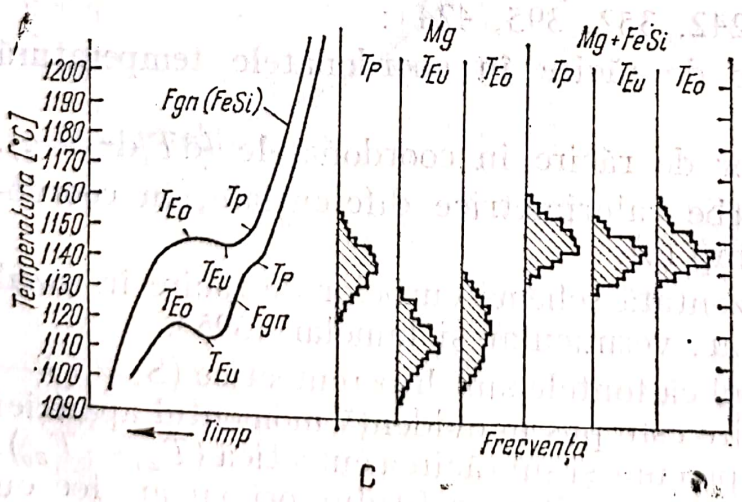


Fig. 2.46. Schema curbelor de răcire pentru fontele cenușii și cu grafit nodular (*a*), cu grafit nodular și vermicular (*b*), a fontelor cu grafit nodular, postmodificate și nepostmodificate (*c*), la $S_c = 1{,}0 \ldots 1{,}1$ (60 măsurări) [395]:

Din datele prezentate în fig. 2.46, *a* se constată că la trecerea de la fontele cenușii la cele cu grafit nodular, temperatura la care apare grafitul primar (T_p) scade cu circa 40°C, în timp ce temperatura de început de cristalizare eutectică (T_{Eu}) scade cu circa 35°C (tabelul 2.20).

Scanned with OKEN Scanner

Trecerea de la fontele cu grafit nodular (nepostmodificate) la cele cu grafit vermicular (fig. 2.46, *b*) are loc cu o mărire a temperaturii de transformare eutectică, în mai mare măsură decît cea a punctului T_p. Autorii consideră că mecanismul apariției grafitului vermicular este mai apropiat de cel al grafitului nodular, decît cel lamelar.

Tabelul 2.20

VALORILE MEDII ALE TEMPERATURILOR T_p, T_{Eu}, T_{Eo} [395]

Tipul fontei	T_p, °C	T_{Eu}, °C	T_{Eo}, °C
Fontă cu grafit lamelar	1175	1150	1160
Fontă cu grafit vermicular	1150	1145	1150
Fontă cu grafit nodular postmodificată cu FeSi85	1148	1140	1140
Fontă cu grafit nodular nepostmodificată	1135	1115	1120

La postmodificarea fontei cu grafit nodular are loc o creștere a valorilor punctelor T_p, T_{Eu} (fig. 2.46, *c*).

În lucrarea [27] se arată că postmodificarea fontei în forma de turnare determină o serie de schimbări pe curbele de răcire:

— se mărește temperatura de transformare eutectică;

— se micșorează numărul „treptelor" de temperatură, la transformarea eutectică;

— se mărește durata răcirii pînă la terminarea solidificării eutectice (considerată a fi 1066°C).

După [66], creșterea valorii temperaturii la transformarea eutectică, în urma postmodificării are loc, pe de o parte, datorită măririi conținutului de siliciu (de ex., de la 2,05 la 2,63%), iar pe de altă parte în urma apariției unui număr mai mare de germeni pe seama cărora apar celulele eutectice.

Creșterea deosebită a numărului de germeni pe care îi realizează postmodificarea în formă, explică mărirea temperaturii transformării eutectice, constatată în acest caz.

În absența postmodificării, fontele pot prezenta în structură carburi iar numărul de germeni este scăzut, astfel că pe curbele de răcire recalescența de la TEU la TER are valori mici, iar după punctul TER temperatura scade cu o viteză mică [66].

Micșorarea conținutului de magneziu în cazul unor fonte hipoeutectice și hipereutectice tratate cu un modificator ce conține 9...11% Mg, 45...50% Si, 0,1...1,0 Mischmetall, 1,8...2,8% Ca și postmodificate cu ferosiliciu determină mărirea proporției de grafit vermicular, ceea ce conduce la deplasări ale punctelor caracteristice pe curbele de răcire (tabelul 2.21). Astfel, în cazul unor fonte hipoeutectice (CE = 3,74...3,84%), mărirea proporției de grafit

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.21

Influența magneziului asupra curbelor de răcire [352]

Tipuî fontei	Magneziu remanent %	Valorile temperaturilor caracteristice °C	
		T_p	T_{Eo}
Hipoeutectică CE =3,74... ...3,84%	0,083	1204	1127
	0,053	1209	1128
	0,037	1212	1133
	0,022	1218	1137
Hipereutectică CE =4,45... ...4,60%	0,086	1170	1137
	0,035	ND	1138
	0,014	ND	1141
	0,005	ND	1147

vermicular în structură determină creșterea temperaturii de apariție a austenitei primare (T_p), precum și a temperaturii maxime a reacției eutectice (T_{Eo}). Autorii consideră că acest ultim punct poate fi utilizat pentru a caracteriza proporția de grafit vermicular, în fontele hipoeutectice.

La fontele hipereutectice nu a fost pusă în evidență apariția grafitului primar, dar și în acest caz trecerea de la grafitul nodular la cel vermicular se realizează prin mărirea temperaturii de transformare eutectică, atît cea minimă T_{Eu} cît și cea maximă T_{Eo} (v. fig. 2.46).

Aspectul curbelor de răcire depinde în mare măsură de poziția fontelor față de eutectic (fig. 2.47).

Utilizarea acestor curbe de răcire permite atît stabilirea valorii carbonului echivalent cît și punerea în evidență a particularităților procesului de grafitizare [66].

În urma prelucrării rezultatelor obținute în cazul a 42 de șarje, autorii lucrării [66] stabilesc următorul model matematic:

$$TEN\text{-}TEU = 617{,}3 - 147{,}6.C - 209{,}0.Si - 57{,}6\,FeSi + 1629{,}0.Mg + 66{,}5.C.Si - 273{,}0.C.Si.Mg + 4{,}6\sqrt{n} - 6{,}96\sqrt{\frac{100\cdot n}{N}} + 3{,}55\,D \quad [°F], \tag{2.35}$$

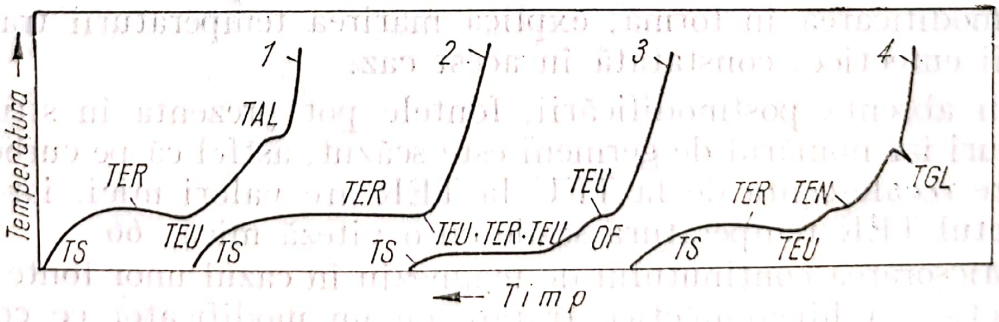


Fig. 2.47. Aspectul curbelor de răcire a fontelor cu diferite poziții față de eutectic [66]:

1 — fontă hipoeutectică; *2* — fontă eutectică; *3* — fontă puțin hipereutectică; *4* — fontă puternic hipereutectică; *TAL* — apariția austenitei primare; *TGL* — apariția grafitului primar; *TEN* — începutul germinării celulelor eutectice; *TEU* — temperatura minimă de subrăcire a fontei la începutul cristalizării eutectice; *TER* — temperatura maximă de transformare eutectică (rezultatul recalescenței); *TS* — terminarea transformării eutectice.

Scanned with OKEN Scanner

$$TER\text{-}TEU = 625{,}0 - 161{,}4.C - 222{,}3.Si - 17{,}0.FeSi + 2283{,}5.Mg + \\ + 73{,}5.C.Si - 394{,}4.C.Si.Mg + 0{,}34\sqrt{n} + 0{,}27\sqrt{\frac{100 \cdot n}{N}} + \\ + 8{,}92.D \quad [°F], \tag{2.36}$$

$$r = 14{,}9 - 3{,}58.C - 4{,}94.Si - 0{,}24.FeSi + 38{,}11.Mg + 1{,}53.C.Si - \\ - 6{,}24.C.Si.Mg - 0{,}01\sqrt{n} + 0{,}04\sqrt{\frac{100 \cdot n}{N}} - 0{,}43.D \ [min], \tag{2.37}$$

$$V = 297{,}9 - 77{,}7.C - 108{,}0.Si - 5{,}2.FeSi + 1126{,}6.Mg + \\ + 35{,}9.C.Si - 194{,}6.C.Si.Mg + 0{,}18\sqrt{n} + 0{,}78\sqrt{\frac{100 \cdot n}{N}} + \\ + 3{,}06.D \quad [°F/min]. \tag{2.38}$$

în care: FeSi este cantitatea de ferosiliciu pentru postmodificare, în %; n — numărul de nodule de grafit pe mm²; N — gradul de nodulizare, în %; D — factor, egal cu zero la utilizarea modificatorului Ni—Mg și egal cu unitatea în cazul modificatorului FeSiMg; r — timpul răcirii de la 2400°F (1315°C) pînă la TEN, în min; v — viteza recalescenței între TEU și TER, în °F/min.

Relațiile (2.36)...(2.38) pot fi utilizate pentru stabilirea gradului de nodulizare și a numărului de separări de grafit pe mm², dacă este cunoscut conținutul de carbon, siliciu și magneziu.

Existența recalescenței între punctele TER-TEU (v.fig.2.47) permite stabilirea gradului de modificare a fontei [31].

În cadrul lucrării [31] au fost puse în evidență deosebirile în ceea ce privește aspectul curbelor de răcire, în cazul fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular (fig. 2.48).

Se constată faptul că fontele cu grafit vermicular ocupă poziție intermediară între cele cu grafit lamelar și nodular.

Autorii lucrării [31] utilizează pentru caracterizarea fontelor derivata curbei de răcire (fig. 2.49), luînd in considerare în special recalescența maximă, la transformarea eutectică.

Modificînd fontele cu diferite cantități de magneziu, au fost obținute proporții variabile de grafit vermicular, ceea ce determină obținerea unor valori distincte în ceea ce privește recalescența maximă (fig.2.50).

Parametrii utilizați în analiza recalescenței fontelor sînt prezentați în fig. 2.51 [31].

O serie de autori [31, 395] consideră că în cazul fontelor cu grafit nodular hipereutectice, in jurul separărilor de grafit primar apărut în intervalul lichidus-solidus, lichidul sărăcește în carbon, astfel că se va transforma într-un inel de austenită, ce inconjoară nodulele, în timp ce restul fontei este lichidă. Apariția acestui

Scanned with OKEN Scanner

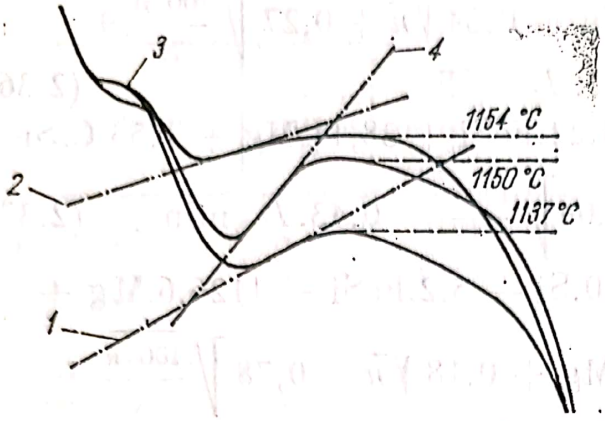


Fig. 2.48. Curbele de răcire ale fontelor cu diferite forme de grafit [31].

1 — fonte cu grafit nodular; *2*—fonte cu grafit lamelar; *3* — apariția austenitei; *4* — fonte cu grafit vermicular.

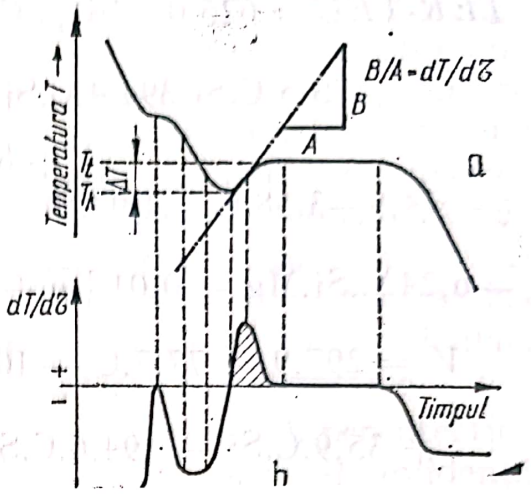


Fig. 2.49. Schema de principiu a curbei de răcire (*a*) și derivata sa (*b*) [31]:

ΔT — mărimea subrăcirii eutectice.

inel (înveliș) de austenită este însoțită de creșterea temperaturii (recalescență), ce poate fi pusă în evidență pe curbele de răcire (fig. 2.52). Autorii citați consideră apariția inelului de austenită ca o particularitate a fontelor cu grafit nodular, la fonta cenușie neconstatîndu-se apariția recalescenței (fig. 2.52), ceea ce poate constitui un indiciu al modificării fontei.

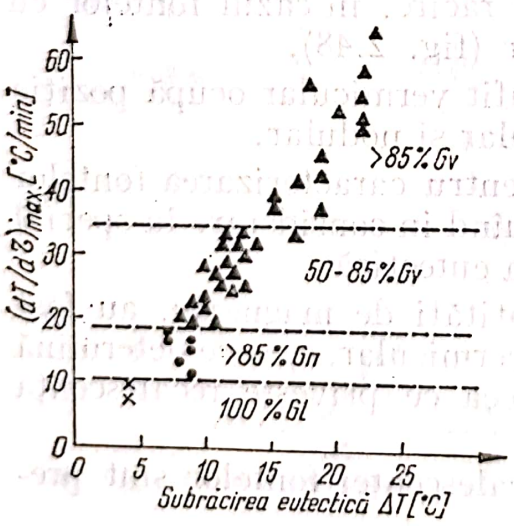


Fig. 2.50. Recalescența ($dT/d\tau$) și subrăcirea eutectică (ΔT) a fontelor cu diferite forme de grafit [31].

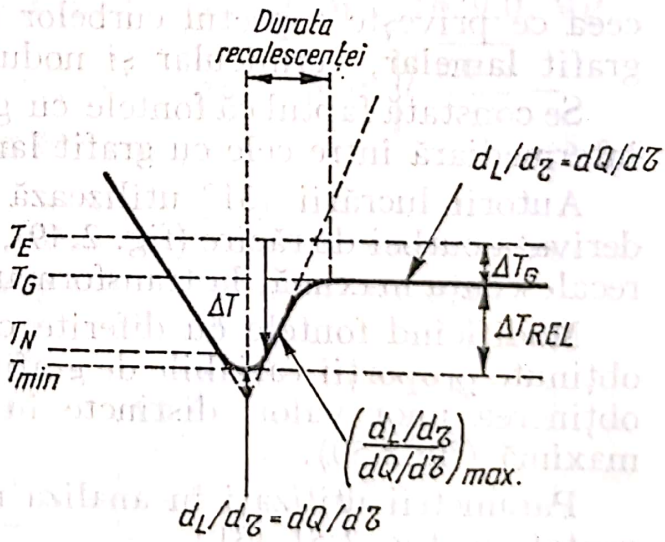


Fig. 2.51. Parametrii utilizați la analiza recalescenței fontelor [31]:

TE — temperatura eutectică de echilibru; T_G — temperatura eutectică în condiții reale; T_N — apariția germenilor celulelor eutectice; ΔT — subrăcirea sub temperatura de echilibru; L — căldura latentă; τ — timpul.

Scanned with OKEN Scanner

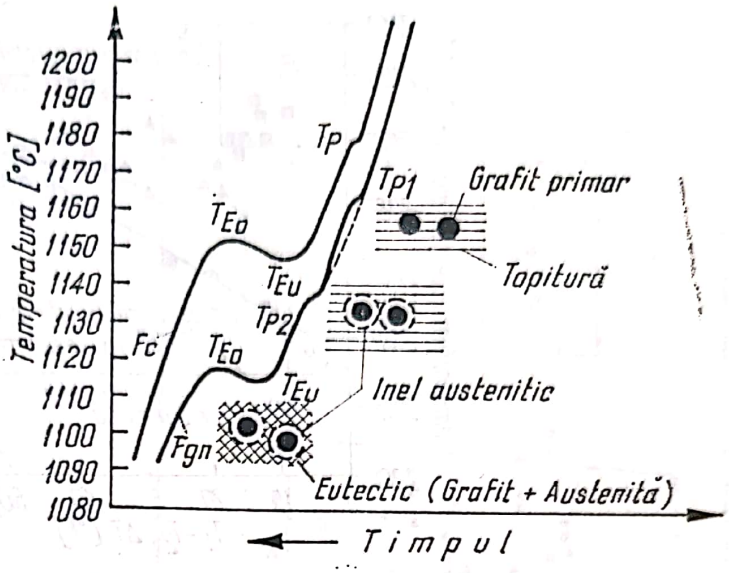


Fig. 2.52. Curbele de răcire ale fontelor cenușii și cu grafit nodular, hipereutectice [395]:

T_P — formarea grafitului primar; T_{P_2} — formarea inelului (învelișului) de austenită; T_{Eu} — T_{Eo} — transformarea eutectică.

Urmărind posibilitatea micșorării tendinței de albire a fontelor cu grafit vermicular, obținute prin modificarea cu ceriu s-au constatat o serie de particularități ale curbelor de răcire, în funcție de prezența în structură a cementitei libere și a diferitelor forme de grafit (fig. 2.53) [188].

În cazul formării grafitului vermicular se obțin valori ridicate pentru temperatura T_1 și $\Delta T = T_1 - T_2$ (fig. 2.54) [188].

Un interes deosebit îl are suprafața de sub curbele de răcire, care poate da informații prețioase atît in ceea ce privește forma garfitului cît și prezența cementitei libere (fig. 2.55) [188].

La fontele cu grafit lamelar, această suprafață depășește 1500 mm², în timp ce la fontele cu grafit vermicular, cu cementită liberă, nu depășește 1060 mm². Fontele cu grafit vermicular, fără cementită liberă, sînt caracterizate prin valori de 1200...1500 mm² pentru suprafața de sub curba de răcire.

Realizîndu-se o analiză pe microcalculator a curbelor de răcire a fontelor modificate cu FeSiMg, se consideră că este posibilă o apreciere rapidă a gradului de nodularitate a grafitului.

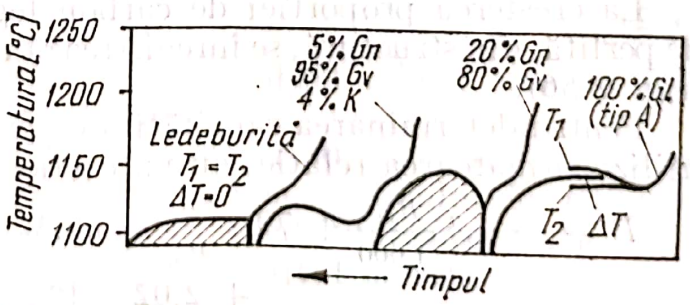


Fig. 2.53. Curbele de răcire ale fontelor modificate cu ceriu cu și fără postmodificare [188]:

T_1 — temperatura maximă de cristalizare eutectică; T_2 — temperatura începutului recalescenței.

Scanned with OKEN Scanner

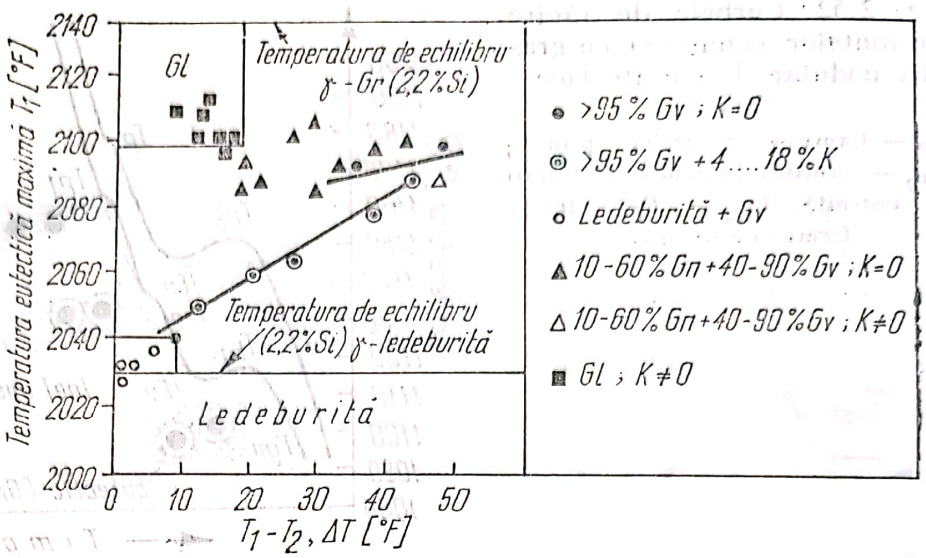


Fig. 2.54. Legătura între structura fontei și parametrii curbelor de răcire (T_1, ΔT) [188].

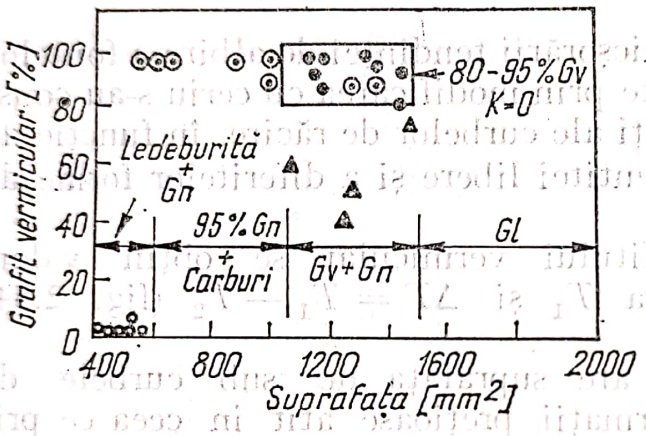


Fig. 2.55. Legătura între structura fontei și suprafața de sub curbele de răcire [188].

2.6.3. Utilizarea metodelor magnetice

Asupra mărimii inducției fontei, în cîmpuri magnetice puternice, cea mai mare influență o are grafitul, în timp ce masa metalică are o acțiune mai slabă.

De exemplu, la cîmpuri cu forța coercitivă peste 100 Oe mărimea inducției fontei cu grafit nodular depășește 14 000 Gs, indiferent de structura masei metalice.

Rezultă deci că metoda magnetică poate fi, în principiu, utilizată pentru stabilirea gradului de compactitate a grafitului precum și a structurii masei metalice [406].

La creșterea proporției de carbon legat, respectiv a cantității de perlită, din structură, se înregistrează o mărire a forței coercitivă (fig. 2.56).

Pentru determinarea cantității de perlită din structură se poate utiliza următoarea relație, cu un coeficient de corelație $r = 0{,}92$:

$$P = -4{,}3\frac{B_m}{1\,000} + 79{,}2\frac{B_r}{B_m} + 39{,}3\frac{H_c}{dB/dH} + 5{,}55\frac{dB}{dH} + 2{,}02 \quad [\%], \tag{2.39}$$

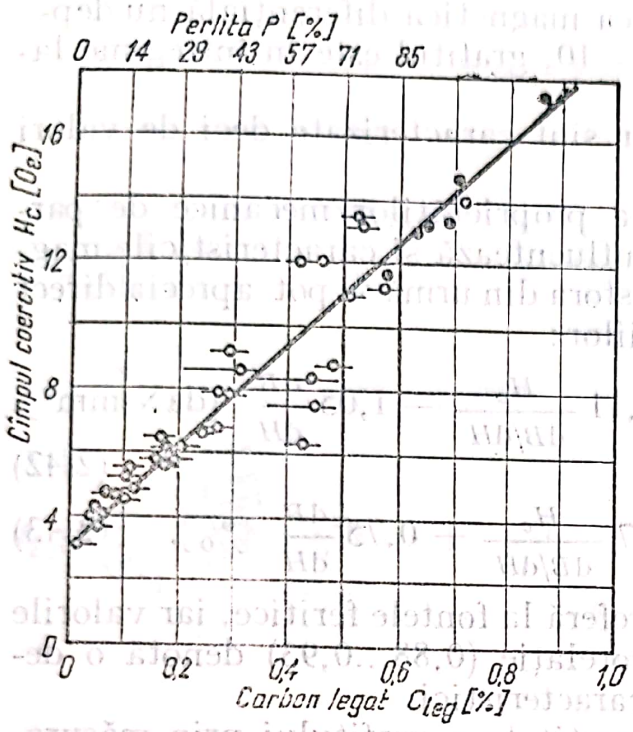


Fig. 2.56. Dependența dintre valoarea cîmpului coercitiv și proporția de carbon legat, respectiv perlită [406].

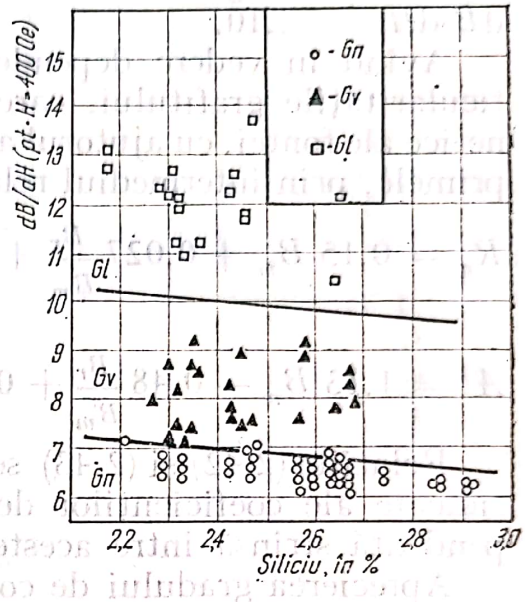


Fig. 2.57. Dependența dintre forma grafitului și permeabilitatea magnetică diferențială [406].

în care: P este proporția de perlită în structură, în %; B_m — inducția magnetică maximă, în Gs; B_r — inducția magnetică remanentă, în Gs; H_c — cîmpul coercitiv, în Oe; dB/dH — permeabilitatea magnetică diferențială.

Gradul de nodulizare a grafitului (GN), este în strînsă dependență de caracteristicile magnetice ale fontei, putînd fi determinat cu relațiile:

— pentru fonta în stare turnată, cu masă metalică variabilă:

$$GN = \frac{18{,}8}{1\,000} \cdot B_m - 301\,\frac{B_r}{B_m} + 40{,}1\,\frac{H_c}{dB/dH} - 5{,}86\,\frac{dB}{dH} - 171 \quad [\%], \tag{2.40}$$

— pentru fonte feritice:

$$GN = \frac{3}{1\,000}\,B_m - 231\,\frac{B_r}{B_m} + 71{,}9\,\frac{H_c}{dB/dH} - 8{,}64\,\frac{dB}{dH} + 81 \quad [\%]. \tag{2.41}$$

Coeficientul de corelație, pentru ambele relații este de 0,98, ceea ce denotă o strînsă dependență.

Avînd în vedere faptul că relațiile (2.40) și (2.41) sînt destul de complexe, pentru o determinare rapidă a gradului de compactitate a grafitului poate fi utilizată permeabilitatea magnetică diferențială (fig. 2.57). Rezultă deci că grafitul nodular este prezent

în fontele la care permeabilitatea magnetică diferențială nu depășește 7, în timp ce la $dB/dH > 10$, grafitul este în întregime lamelar.

Fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate deci de valori $dB/dH = 7...10$.

Avînd în vedere dependența proprietăților mecanice de particularitățile grafitului, care influențează și caracteristicile magnetice ale fontei, cu ajutorul acestora din urmă se pot aprecia direct primele, prin intermediul relațiilor:

$$R_m = 0{,}15\, B_m + 0{,}027 \frac{B_r}{B_m} + 0{,}11 \frac{H_c}{dB/dH} - 1{,}05 \frac{dB}{dH} \quad [daN/mm^2], \tag{2.42}$$

$$A = 1{,}13\, B_m - 0{,}48 \frac{B_r}{B_m} + 0{,}17 \frac{H_c}{dB/dH} + 0{,}75 \frac{dB}{dH} \quad [\%]. \tag{2.43}$$

Relațiile (2.42) și (2.43) se referă la fontele feritice, iar valorile ridicate ale coeficienților de corelație (0,88...0,93) denotă o dependență strînsă între aceste caracteristici.

Aprecierea gradului de compactitate a grafitului prin măsurarea permeabilității magnetice diferențiale constituie o metodă simplă și rapidă.

2.6.4. Determinarea caracteristicilor electrice

O metodă de stabilire a gradului de modificare, prin determinarea valorii magneziului remanent constă în măsurarea rezistivității electrice a fontei [42].

Utilizînd o fontă cu 3,83% C, 2,92% Si, 0,72% Mn, 0,23% P și 0,034% S, modificată cu magneziu, a fost măsurată rezistivitatea electrică cu ajutorul instalației, a cărei schemă este prezentată în fig. 2.58 [42]. Conținutul de magneziu al fontei a fost determinat pe cale spectrală.

Corelația între conținutul de magneziu al fontei și rezistivitatea electrică a acesteia este prezentată în fig. 2.59.

Pentru determinarea valorii magneziului remanent se propune relația:

$$[\%Mg]_{rem} = -0{,}0062\, [R_x - 7{,}12] + 0{,}192, \tag{2.44}$$

în care: R_x este rezistivitatea electrică a fontei, în $\mu\Omega$.

Corelația prezentată în fig. 2.59 poate fi explicată prin influența formei grafitului asupra caracteristicilor electrice ale fontei (v. § 4.2.4).

O altă lucrare recomandă controlul formei grafitului prin măsurarea rezistivității electrice a fontei [151].

Scanned with OKEN Scanner

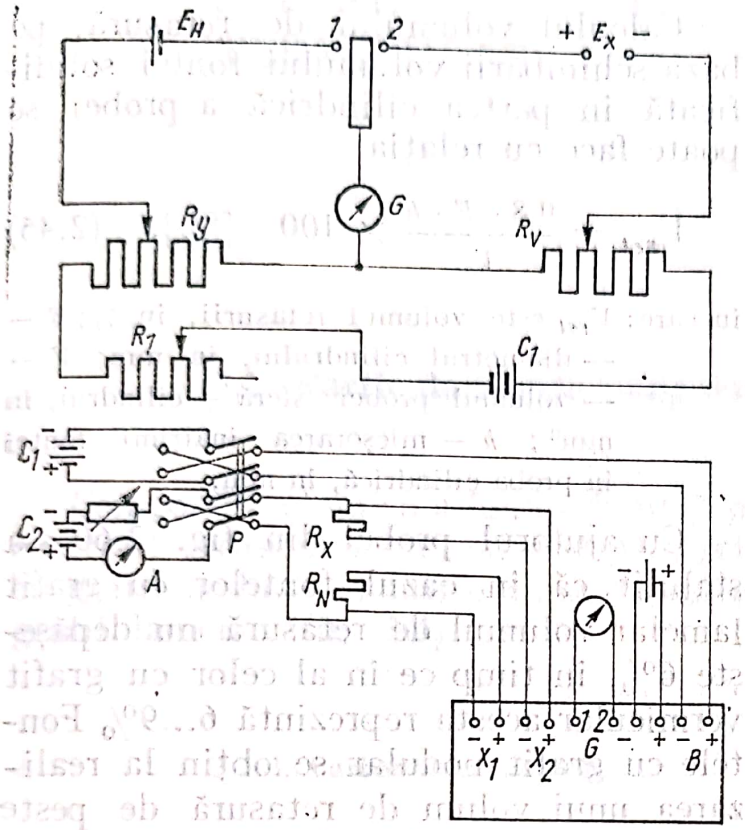


Fig. 2.58. Schema instalației pentru măsurarea rezistivității electrice a fontei [42].

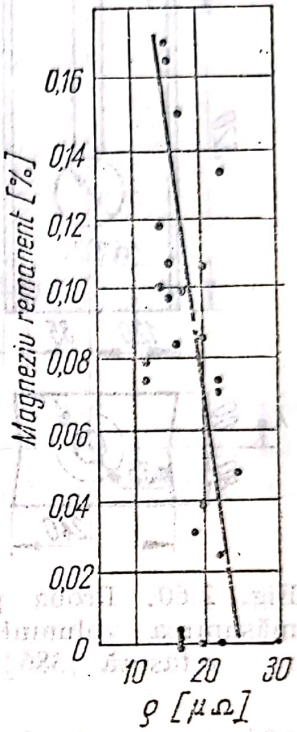


Fig. 2.59. Corelația între magneziul remanent și rezistivitatea electrică a fontei [42].

Se remarcă faptul că fontele cu grafit lamelar prezintă cele mai ridicate valori ale rezistivității electrice, în timp ce la trecerea, de la grafitul lamelar la cel vermicular rezistivitatea electrică scade, cele mai mici valori obținîndu-se la fontele cu grafit nodular.

2.6.5. Măsurarea volumului de retasură

Avînd în vedere legătura directă între contracție și forma grafitului din fontă (v. §4.4.2.) poate fi stabilit gradul de modificare, respectiv caracteristicile structurale prin măsurarea volumului de retasură. În acest scop pot fi utilizate diverse tipuri de probe, una dintre acestea fiind prezentată în fig. 2.60 [386]. În cazul acestei probe, întreaga retasură este deplasată în partea cilindrică, unde se înregistrează o micșorare a înălțimii fontei, corespunzător retasurii din partea sferică, alimentată cu fontă lichidă.

Scanned with OKEN Scanner

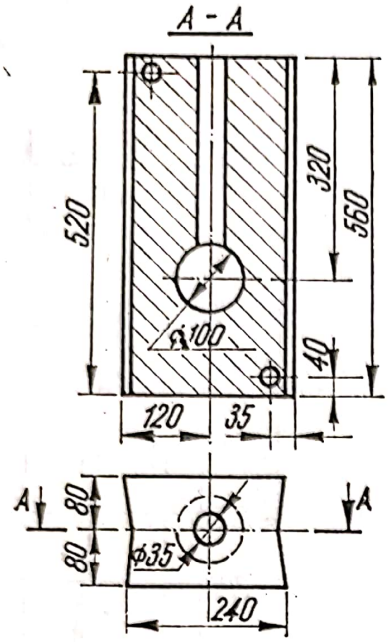


Fig. 2.60. Proba pentru măsurarea volumului de retasură [386].

Calculul volumului de retasură, pe baza schimbării volumului fontei solidificată în partea cilindrică a probei, se poate face cu relația

$$V_{ret} = \frac{0{,}8 \cdot d^2 \cdot h}{V} \times 100 \quad [\%], \quad (2.45)$$

în care: V_{ret} este volumul retasurii, în %; d — — diametrul cilindrului, în mm; V — — volumul probei (sferă + cilindru), în mm³; h — micșorarea înălțimii fontei în proba cilindrică, în mm.

Cu ajutorul probei din fig. 2.60 s-a stabilit că în cazul fontelor cu grafit lamelar volumul de retasură nu depășește 6%, în timp ce în al celor cu grafit vermicular acesta reprezintă 6...9% Fontele cu grafit nodular se obțin la realizarea unui volum de retasură de peste 9%, respectiv la o micșorare a nivelului fontei în partea cilindrică a probei de peste 80...90 mm [386].

2.6.6. Utilizarea curbelor de contracție liniară

Gradul de compactizare al grafitului poate fi apreciat cu o destul de ridicată exactitate prin trasarea curbelor de contracție în stare solidă, respectiv prin măsurarea valorilor dilatării inițiale (v.§ 4.2.1). Între caracteristicile grafitului și valorile dilatării inițiale (D_i) există legături de următorul ordin de mărime:

— grafit lamelar . . . . . $D_i = 0...0{,}25\%$;
— grafit lamelar + vermicular . . . . . $D_i = 0{,}15...0{,}35\%$;
— grafit vermicular . . . . . $D_i = 0{,}25...0{,}5\%$;
— grafit vermicular + nodular . . . . . $D_i = 0{,}4...0{,}6\%$;
— grafit nodular . . . . . $D_i = 0{,}5...1{,}0\%$.

Această metodă de control prezintă avantajul că se poate utiliza înainte ca fonta modificată să fie turnată în piese.

Scanned with OKEN Scanner

3. ELABORAREA FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR

3.1. Particularităţile compoziţiei chimice

Compoziţia chimică a fontei de bază pentru producerea fontelor cu grafit vermicular nu se deosebeşte, principial, de cea a fontelor cu grafit nodular şi într-o anumită măsură, de cea a fontelor cu grafit lamelar (fig. 3.1).

3.1.1. Carbonul şi siliciul

Dependenţa rezistenţei la tracţiune a fontelor faţă de valoarea carbonului echivalent, care înglobează în principal acţiunea carbonului şi siliciului, este prezentată în fig. 3.2 [333].

Fontele cu grafit lamelar sînt cele mai sensibile faţă de creşterea valorii carbonului echivalent, care afectează doar în mică măsură fontele cu grafit nodular. Se remarcă faptul că la fontele cu grafit vermicular rezistenţa la tracţiune scade doar cu 15...20%,

Fig. 3.1. Limitele compoziţiei la fontele de grafit vermicular.

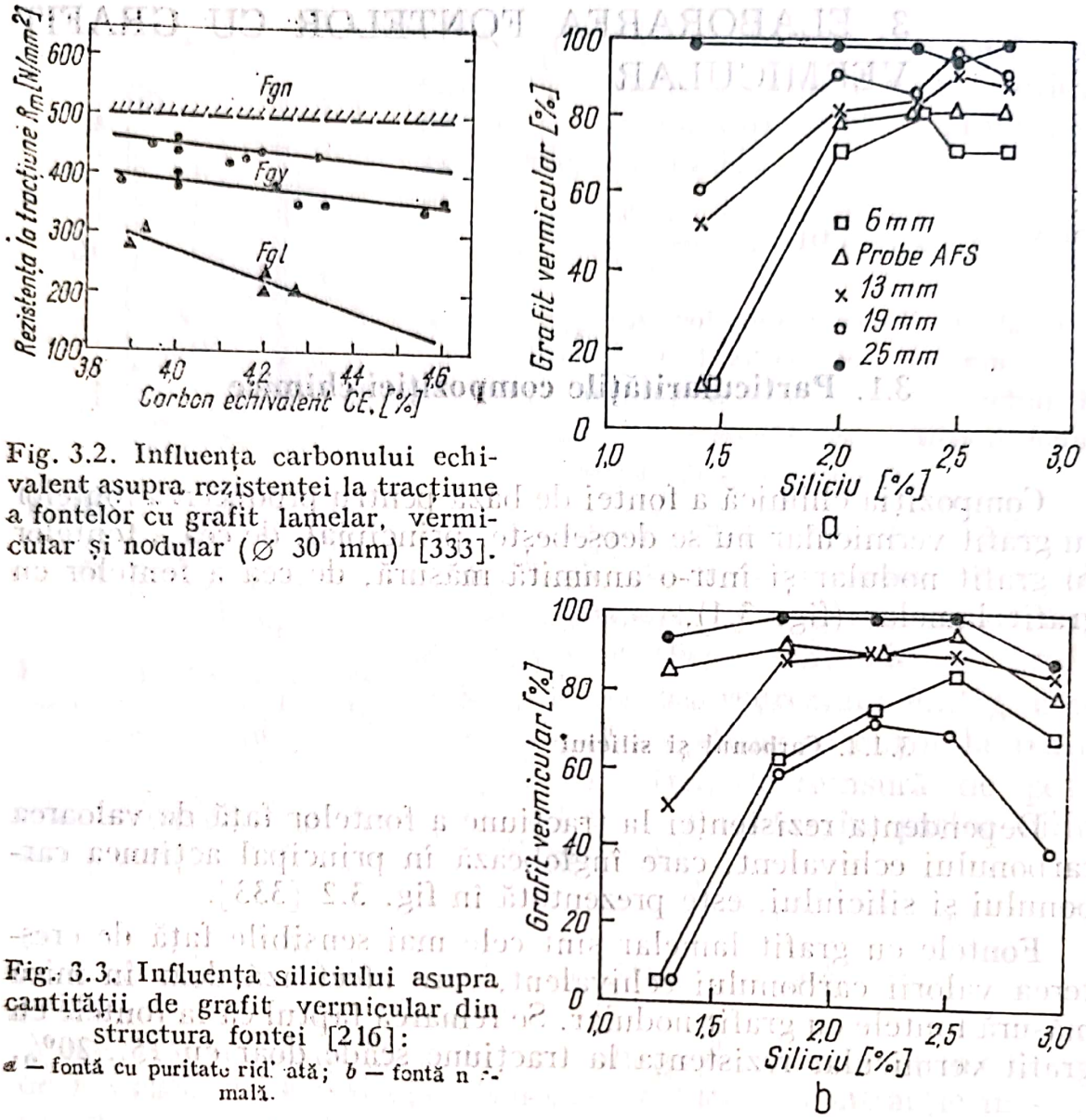


Fig. 3.2. Influența carbonului echivalent asupra rezistenței la tracțiune a fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular (∅ 30 mm) [333].

Fig. 3.3. Influența siliciului asupra cantității de grafit vermicular din structura fontei [216]:
a — fontă cu puritate ridicată; *b* — fontă normală.

în urma măririi carbonului echivalent de la 3,9 la 4,6%, valorile fiind apropiate de cele realizate la fontele cu grafit nodular.

Conținutul de siliciu al fontei influențează în mare măsură sensibilitatea la formarea cementitei libere, în strînsă dependență cu grosimea de perete. De asemenea, afectează și proporția de grafit vermicular din structura fontei (fig. 3.3) [216].

La valori sub 1,5% Si structura conține cementită liberă, la toate grosimile de perete. La valori mari ale conținutului de siliciu, scăderea proporției de grafit vermicular este pusă pe seama creșterii cantității de grafit nodular.

Efectul grafitizant al siliciului la formarea structurii secundare determină micșorarea cantității de perlită, la toate grosimile de perete. Acest efect se constată atît în cazul în care încărcătura a fost formată din fontă de puritate ridicată (max. 0,3% Mn) (fig.

Scanned with OKEN Scanner

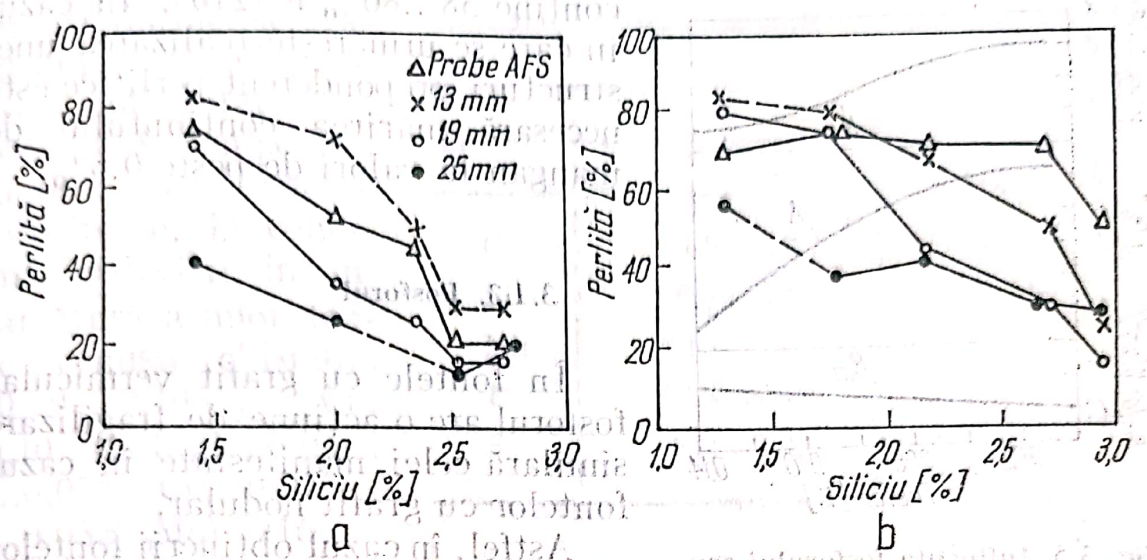


Fig. 3.4. Influența siliciului asupra proporției de perlită [216]:
a — fontă cu puritate ridicată (max. 0,3% Mn); *b* — fontă normală (0,6...0,7% Mn).

3.4, *a*), cît și atunci cînd a fost utilizată o fontă cenușie obișnuită (0,6...0,7% Mn; elemente însoțitoare) (fig. 3.4, *b*) [216].

Se recomandă ca valoarea carbonului să nu depășească 3,7% iar cea a siliciului 3% [253].

Urmărind influența compoziției chimice (C, Si, Mn, P) asupra proprietăților fontelor cu grafit vermicular, obținute prin modificarea cu elemente din grupa pămînturilor rare, s-a remarcat faptul că cea mai puternică influență o au carbonul și manganul [2].

3.1.2. Manganul

Așa cum rezultă și din fig. 3.1, producătorii de fontă cu grafit vermicular utilizează o gamă largă a conținuturilor de mangan (0,05...1,2%). Cantitatea de mangan din fontă este determinată de către natura încărcăturii utilizate și de constituenții masei metalice urmărite. Avînd în vedere faptul că în marea majoritate a cazurilor piesele turnate din fontă cu grafit vermicular au o structură preponderent feritică, conținutul de mangan nu depășește de regulă 0,6...0,7%. Trebuie avut în vedere faptul că în cazul acestui tip de fontă sensibilitatea la formarea feritei în urma transformării eutectoide este mai mare decît la celelalte tipuri de fonte, motiv pentru care nu este necesar un conținut foarte scăzut de mangan pentru a asigura o structură feritică, direct din turnare. Astfel, în condițiile utilizării in încărcătură a unor fonte cu puritate ridicată, cu max. 0,3% Mn, se obține în structură 50...86% F, în timp ce la o încărcătură cu 0,6...0,7% Mn, structura în stare turnată

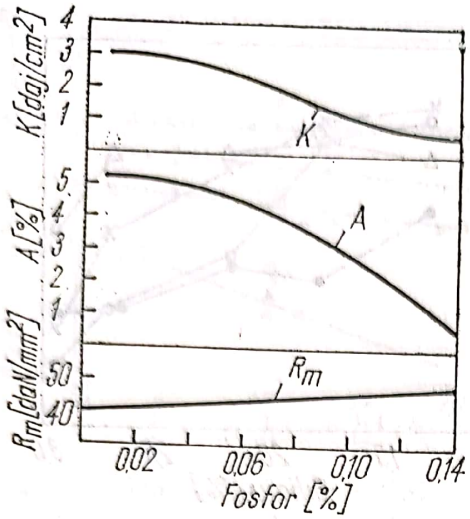


Fig. 3.5. Influența fosforului asupra caracteristicilor fontelor cu grafit vermicular [2].

conține 58...80% F [216]. În cazul în care se urmărește realizarea unei structuri preponderent perlitice este necesară mărirea conținutului de mangan la valori de peste 0,8%.

3.1.3. Fosforul

În fontele cu grafit vermicular fosforul are o acțiune de fragilizare similară celei manifestate în cazul fontelor cu grafit nodular.

Astfel, în cazul obținerii fontelor cu grafit vermicular prin modificarea cu elemente din grupa pământurilor rare (0,10...0,15% PR_{rem}), s-a constatat că la valori de circa 0,05%P reziliența începe să scadă, în timp ce la peste 0,10%P și alungirea atinge valori scăzute (fig. 3.5) [2]. În general se consideră că plasticitate și tenacitate ridicată se asigură la valori ale conținutului de fosfor ce nu depășesc 0,08%.

3.1.4. Sulful

Conținutul de sulf al fontei supuse modificării constituie principalul factor care determină consumul de modificator, siguranța efectului modificator, calitatea și costul fontei (v. cap.2).

Din această cauză, în marea majoritate a cazurilor se recomandă utilizarea unor fonte care, înainte de modificare, să nu conțină mai mult de 0,03%S (fig. 3.1).

3.1.5. Elemente însoțitoare

Este cunoscut faptul că la producerea fontei cu grafit nodular o problemă deosebită o constituie elementele însoțitoare, cu efect antimodificator, care periclitează posibilitatea obținerii unor separări de grafit compact sau chiar anulează efectul modificator (v. § 2.3.3.1.).

În cazul fontelor cu grafit vermicular, acțiunea acestor elemente poate fi utilizată în vederea asigurării obținerii formelor intermediare de grafit (v.§2.3.3.). Rezultă deci că la aceste tipuri de fonte se impun condiții mai puțin restrictive din punctul de vedere al elementelor însoțitoare.

Scanned with OKEN Scanner

S-a remarcat faptul că obținerea grafitului vermicular nu este influențată de prezența în compoziția fontei a unor elemente însoțitoare, în condițiile utilizării în încărcătură a unor fonte cenușii obișnuite (0,09...0,10 % Cu, 0,10...0,11%Ni, 0,04...0,07% Cr, 0,027...0,032%Mo) [216].

Tabelul 3.1

COMPOZIȚIA CHIMICĂ DE BAZĂ A FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR (v. fig. 3.1)

Elementul	Limite de variație %	Interval utilizat, %
C	3,0...4,4	3,4...3,8
Si	0,9...3,5	2,4...3,0
Mn	0,05...1,2	0,1...0,6
P	0,01...0,20	0,01...0,08
S	0,005...0,12	0,005...0,03

Analiza matematică a datelor experimentale a condus la recomandarea, în cazul modificării cu elemente din grupa pământurilor rare și în vederea obținerii unor proprietăți mecanice și tehnologice superioare, precum și o tendință scăzută de albire a compoziției: 3,5...3,6%C, 2,4...2,6%Si, 0,6...0,8%Mn, 0,02...0,06%P și 0,10...0,15% PR_{rem} [2].

În cazul modificării fontelor cu Mg, Ti, Ce, se recomandă următoarea compoziție chimică: 3,1...3,9%C, 1,7...2,9%Si, 0,1...0,6% Mn, max. 0,02%S, max. 0,06%P [333].

Analiza datelor existente în literatura de specialitate (v.fig. 3.1) permite conturarea intervalului de valori cu o frecvență mai mare (tabelul 3.1): 3,4...3,8%C, 2,4—3,0%Si, 0,1...0,6%Mn, max. 0,08%P, max. 0,03%S.

3.2. Agregate de elaborare

Fontele, supuse modificării în vederea obținerii grafitului vermicular, prezintă unele particularități din punctul de vedere al condițiilor de elaborare:

— *carbonul*, variind în limitele 3,0...4,0%, poate fi realizat în orice agregat de elaborare (cubilou sau cuptoare electrice);

— *siliciul*, în general în intervalul 1,5...3,0%, nu ridică probleme din punctul de vedere al realizării valorilor impuse;

— *manganul* este reglat prin intermediul componentelor încărcăturii; valori de max. 0,3% pot fi realizate în condițiile utilizării fontelor cu puritate ridicată, în timp ce valori mai mari se obțin la o încărcătură obișnuită;

— *fosforul* este limitat la valori de max. 0,08%, ceea ce impune utilizarea unei încărcături corespunzătoare sau, eventual, o defosforare a fontei;

Scanned with OKEN Scanner

— conținutul de *sulf*, limitat la max. 0,03%, constituie elementul restrictiv al compoziției chimice a fontei; acest lucru impune utilizarea unei încărcături cu conținut scăzut ce sulf, precum și aplicarea unor tehnologii eficiente de desulfurare în agregatul de elaborare sau în afara sa;

— din punctul de vedere al *elementelor însoțitoare* nu se impun condiții restrictive, dar este necesară cunoașterea conținutului acestora, de care se va ține seama la stabilirea tehnologiei de modificare;

— un conținut scăzut de *oxigen* în fonta supusă modificării determină o reducere a consumului de modificator.

Avînd în vedere condițiile impuse fontelor cu grafit vermicular, se recomandă utilizarea cuptoarelor electrice ca agregate de elaborare pentru obținerea acestui tip de fontă. Nu este exclusă însă posibilitatea utilizării cubilourilor acide, dar în acest caz sînt necesare măsuri speciale care să asigure obținerea unor fonte cu sulf scăzut și temperatură ridicată. Conținutul scăzut de sulf al fontei înainte de modificare determină necesitatea unei desulfurări și în afara cubiloului, în oală sau într-un alt agregat de elaborare (sistem duplex).

Desulfurarea fontei de cubilou cu carbură de calciu tehnică precum și cu cea rezultată ca deșeu al producției carbidice a permis obținerea unor fonte cu grafit vermicular de bună calitate [260]

Valorile ridicate ale temperaturii fontei supuse modificării (minim 1400°C) determină necesitatea realizării unei supraîncălziri economice, la un consum minim de energie.

În ceea ce privește utilizarea *cubilourilor* se remarcă o serie de tendințe de modernizare și intensificare a proceselor metalurgice din acest agregat:

— utilizarea oxigenului suplimentar (23...28% O_2), ceea ce permite reduceri importante ale consumului de cocs și feroaliaje, micșorarea consumului fontei de primă fuziune, mărirea temperaturii fontei și a productivității cubilourilor etc. [438];

— utilizarea aerului cald constituie opțiunea generală a producătorilor de piese turnate din fontă ce utilizează cubilouri [171, 176];

— cubilourile cu două rînduri de guri de aer, cu distribuție egală a acestuia, capătă o extindere deosebită (peste 100 turnătorii în Anglia) [43, 171, 341];

— deșeurile de carbură de siliciu, din industria materialelor abrazive, constituie materiale de adaos, sub formă de brichete, în vederea dezoxidării zgurei și fontei, ceea ce favorizează un proces mai intens de desulfurare, contribuind de asemenea la corectarea conținutului de siliciu [175];

Scanned with OKEN Scanner

— se extind preocupările în direcția înlocuirii, parțiale sau totale, a cocsului de turnătorie; în acest sens se remarcă realizările în domeniul exploatării cubilourilor fără cocs [119, 144], a injectării prafului de cocs [171, 341] etc.

Din punct de vedere constructiv se remarcă utilizarea cubilourilor „metalurgice" cu profil tronconic, fără căptușeală în zona de topire, cu evacuarea prin sifon, dotate cu sisteme complexe de purificare a gazelor, sisteme automate de încărcare, asistate de calculator etc.

Cuptoarele cu inducție constituie agregatele de elaborare cele mai utilizate pentru producerea fontelor cu grafit vermicular. Preocupările în direcția perfecționării tehnologiei de elaborare a fontelor în cuptoarele cu inducție se concretizează, în principal, în următoarele:

— în cazul căptușelii acide, utilizarea unor cuarțite cu max. 0,3% H_2O (uscate în prealabil) asigură o mărire a durabilității de 2...7 ori [273, 345, 387];

— utilizarea căptușelii neutre, pe bază de distensillimanit și corindon sau electrocorindon asigură pierderi prin ardere foarte scăzute, fonte cu oxigen mai scăzut (de 2...3 ori), supraîncălziri mai înalte [193, 346];

— deșeurile de carbură de siliciu constituie materiale de adaus, frecvent întîlnite în cazul cuptoarelor acide, cu rolul de a micșora conținutul de oxizi de fier din fontă și zgură [388];

— preîncălzirea încărcăturii constituie o operație tehnologică impusă de necesitatea micșorării consumului specific de energie electrică; această operație se poate realiza în cuptoare sau în bena de încărcare [61];

— desulfurarea fontei în cuptorul cu inducție, cu căptușeală acidă este posibilă, utilizînd în acest scop CaC_2 la o granulație de 1...3 mm introdusă în topitură la 1300...1350°C, realizîndu-se o supraîncălzire la 1420...1450°C, la un brasaj de 10...14%, după care are loc îndepărtarea zgurei.

Cuptoarele electrice cu arc constituie de asemenea agregate posibile pentru elaborarea fontelor cu grafit vermicular, prezentînd avantajul unor operații de desulfurare și defosforare avansate și dezvanatajul unei operații de carburare greoaie.

3.3. Încărcătura

Față de fontele cu grafit nodular, cele cu grafit vermicular impun condiții apropiate, dar mai puțin restrictive, din punctul de vedere al conținutului de sulf și fosfor, în schimb se admit limite

Scanned with OKEN Scanner

mai largi (dar cunoscute) pentru elementele însoțitoare cu caracter antimodificator.

Cele mai bune rezultate se obțin în cazul utilizării în încărcătură a fontelor de înaltă puritate. De exemplu, utilizînd o astfel de fontă (MAG), a fost suficient un adaos de 0,04...0,05% MM, pentru a asigura 80...95% Gv și 80...100% F, obținîndu-se $R_m = 420$ N/mm² și $A = 2{,}5...3{,}5\%$ [23, 331].

Utilizarea unei încărcături formate din 10...50% FIP (Î.P.T. Cîmpina sau Î.F.Vlăhița), deșeuri proprii și deșeuri de oțel asigură o obținere stabilă a grafitului vermicular.

În cazul în care în încărcătură este utilizară fontă de primă fuziune obișnuită (FK sau FAK), cu max. 0,05% S, se obțin fonte cu grafit vermicular caracterizate printr-o alungire mai scăzută.

Utilizarea unei încărcături obișnuite, dar asigurarea unui proces eficient de desulfurare asigură un efect economic superior cazului în care încărcătura este constituită din fontă de înaltă puritate.

Avînd în vedere faptul că consumul de modificator și siguranța efectului modificator sînt direct determinate de către conținuturile de oxigen și sulf, se consideră că, din punct de vedere economic este mai avantajoasă utilizarea fontelor sintetice [150, 159, 192].

3.4. Desulfurarea fontei în afara agregatului de elaborare

Avînd în vedere faptul că sulful constituie un element care determină consumul de modificator și reproductibilitatea rezultatelor se impune necesitatea desulfurării fontei înainte de modificare.

Desulfurarea se realizează cu ajutorul elementelor cu afinitate față de sulf mai mare decît fierul. În această grupă se pot încadra elementele: Mn, Ca, Ce, Na, Mg.

3.4.1. Desulfurarea cu CaC_2

Carbura de calciu constituie un material activ în cadrul procesului de desulfurare, efectul acestei reacții fiind exoterm, deci operația are loc fără răcirea fontei.

Desulfurarea în afara agregatului de elaborare, cu ajutorul carburii de calciu, impune în mod obligatoriu agitarea fontei, în vederea măririi suprafeței de contact între aceasta și agentul desulfurant. Acest lucru este posibil în cazul utilizării unor gaze pentru barbotarea fontei sau a unei agitări mecanice (prin vibrare, cu pale de agitare etc.).

Scanned with OKEN Scanner

Barbotarea fontelor cu ajutorul *gazelor* cunoaște o largă varietate de procedee, în ceea ce privește gazul utilizat, modul de introducere în fonta lichidă, agentul desulfurant utilizat etc.

Un patent englez (Nr. 1.027.537) recomandă metoda *Gazal*, care prevede utilizarea a o serie de gaze pentru agitarea fontei lichide. În acest scop se utilizează azot, gaz metan, propan-butan, iar pentru a micșora conținutul de gaze în fonta lichidă, argon.

Gazele sînt introduse în fonta lichidă din oală printr-un *dop poros*, realizat din cărămizi refractare din corund sau mulit.

Se recomandă ca gazul introdus să fie dirijat tangențial în raport cu mișcarea fontei lichide. În acest fel, materialele ușoare adăugate pe suprafața băii sînt antrenate către baza oalei iar cele grele împiedicate să se decanteze în această zonă.

Micșorarea temperaturii fontei lichide în timpul barbotării cu gaze nu depășește pierderile naturale datorită radiației la suprafața băii. De exemplu, în timpul barbotării fontei într-o oală de 1,0 t la un consum de gaz de 0,1 m^3/t, scăderea temperaturii a fost de 8...10°C/min.

Schema instalației pentru barbotarea cu gaze a fontei lichide este prezentată în fig. 3.6.

Desulfurarea se intensifică odată cu creșterea activității anionilor liberi de oxigen în zgură și cu scăderea oxigenului în fonta lichidă. Din această cauză, gazul metan se dovedește a fi superior altor agenți de barbotare, realizîndu-se în acest caz și o micșorare a conținutului de oxigen din fontă pe seama carbonului și hidrogenului puși în libertate.

Utilizarea aerului pentru barbotarea fontei prezintă dezavantajul creșterii conținutului de oxigen al acesteia.

În condiții industriale, pentru desulfurarea fontelor prin această metodă se utilizează pe scară largă barbotarea cu azot.

Adaosul de CaC_2 este cuprins în limitele 0,5...2,0% din masa fontei. Timpul de barbotare a fontei în oale de pînă la 1,0 t este de 3 min, iar pentru oale de 10...30 t, de 5—6 min, asigurîndu-se un grad de desulfurare de circa 80% [274].

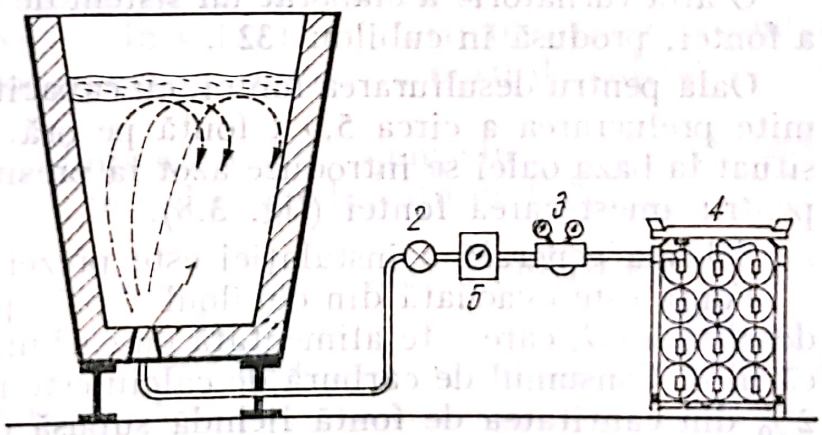


Fig. 3.6. Schema instalației pentru barbotarea cu gaze a fontei:
1 — dop poros; *2* — ventil de blocare; *3* — reductor; *4* — azot în butelie; *5* — debitmetru de gaz [112].

Scanned with OKEN Scanner

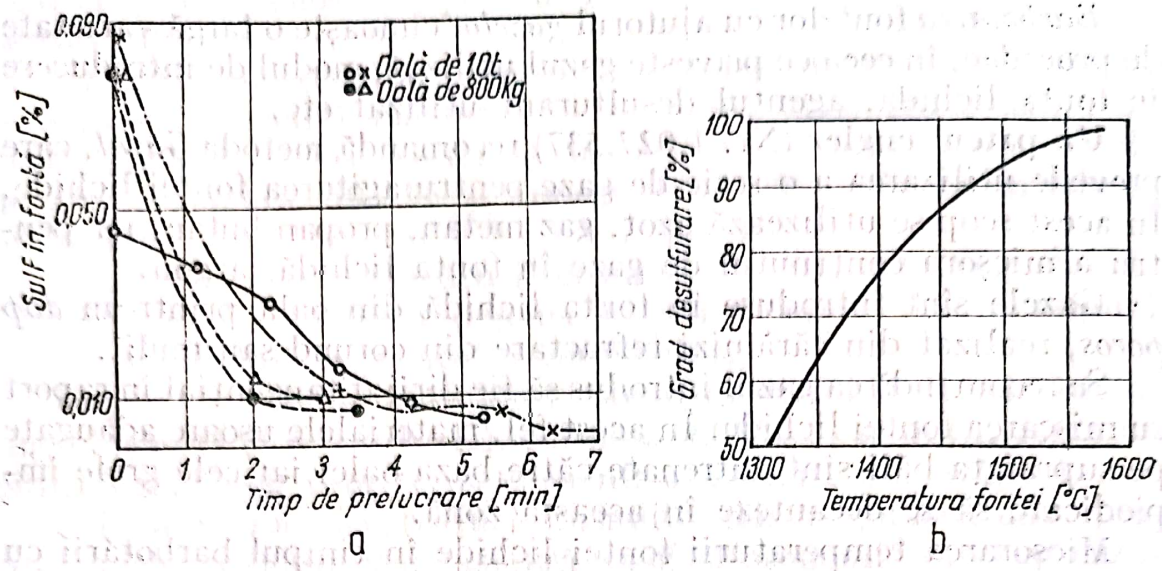


Fig. 3.7. Desulfurarea fontei în funcție de durata de prelucrare (*a*) și temperatură (*b*) [112].

Creșterea duratei de prelucrare poate duce la micșorarea conținutului de sulf pînă la 0,005% (fig. 3.7).

Temperatura fontei în momentul desulfurării determină mărirea gradului de desulfurare (fig. 3.7, *b*).

Pentru obținerea fontelor cu grafit nodular, într-o turnătorie se aplică desulfurarea în oale de 2,2 t. În două oale se introduc 83,5 kg CaC_2 în pachete din materiale organice; după ce în oală se găsește fontă cu o înălțime mai mare de 300 mm începe să se sufle azot timp de 1,5 min. Conținutul de sulf scade de la 0,068% la 0,008...0,02%, temperatura fontei neînregistrînd practic variații. Dopurile poroase prin care se suflă azotul durează 60...100 operații [274].

Adăugarea concomitentă a 1,0...1,5% CaC_2 și 1% grafit măcinat asigură atît o carburare a fontei, de la 3,1...3,2% C la 3,6... 3,8% C, cît și o scădere a conținutului de sulf de la 0,10...0,12% la 0,009...0,02% [112].

O altă turnătorie a elaborat un sistem de desulfurare continuă a fontei, produsă în cubilou [32].

Oala pentru desulfurarea fontei, cu capacitatea de 450 kg, permite prelucrarea a circa 5,0 t fontă pe oră. Printr-un dop poros situat la baza oalei se introduce azot la presiunea de 3,5 daN/cm² pentru amestecarea fontei (fig. 3.8).

Schema generală a instalației este prezentată în fig. 3.9.

Fonta este evacuată din cubiloul *1* prin jgheabul *2* în oala de desulfurare *3*, care este alimentată cu carbură de calciu din buncărul *4*. Consumul de carbură de calciu este reglat în limitele 0... 2% din cantitatea de fontă lichidă supusă desulfurării, atingînd

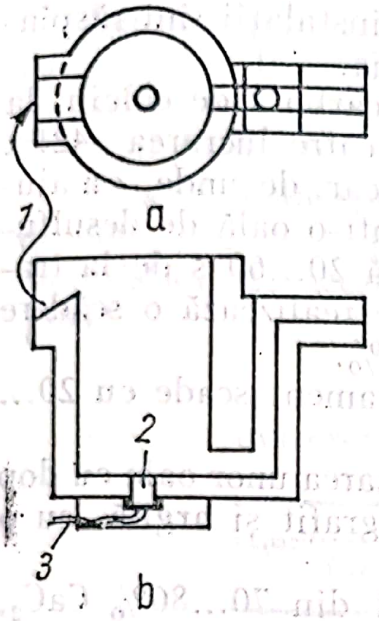


Fig. 3.8. Schema oalei pentru desulfurarea fontei [32]:
a — vedere de sus; *b* — secțiune transversală; *1* — jgheab pentru îndepărtarea zgurei; *2* — dop poros; *3* — racord pentru alimentarea cu azot.

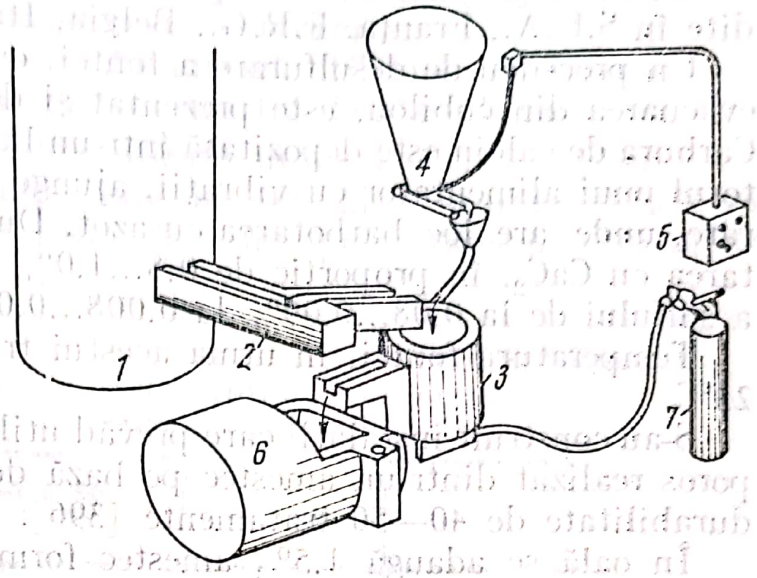


Fig. 3.9. Schema generală a instalației de desulfurare [32]:
1 — cubilou; *2* — jgheab; *3* — oală pentru desulfurare; *4* — buncăr pentru CaC_2; *5* — sistem de control și reglare a adaosului de CaC_2; *6* — antecreuzet; *7* — butelie de azot.

valori medii de 1,5% în primele 15 min și 1% în restul perioadei de topire. Dimensiunile bucăților de carbură de calciu sînt de 16 mm, iar temperatura fontei pe jgheabul cubiloului de 1560...1590°C.

Fonta este evacuată din cubilou cu 0,08% S, ajungînd după tratarea cu carbură de calciu în antecreuzetul *6* cu 0,007...0,012% S.

Construcția jgheabului cubiloului permite și evacuarea fontei direct în antecreuzet, pentru cazul în care nu este necesară o desulfurare avansată, ceea ce asigură însă economie de timp.

O instalație tot pentru desulfurarea continuă a fontei elaborată în cubilou prezintă și lucrarea [58].

Este utilizat un cubilou cu aer rece, cu căptușeală acidă, la care se urmărește obținerea continuă a unor fonte cu sulf scăzut.

Cubiloul este prevăzut cu două instalații, una pentru îmbogățirea aerului cu oxigen, în vederea creșterii temperaturii fontei și o alta pentru introducerea în fontă a carburii de calciu, în vederea desulfurării.

Carbura de calciu, dintr-un buncăr ajunge în antecreuzet, unde se suflă azot. În oală se introduce modificatorul FeSiMg, realizîndu-se și aici o barbotare cu azot.

Cărămizile poroase rezistă la prelucrarea a circa 1000 t fontă.

Sulful scade de la 0,07% la 0,012%. Instalația necesită următoarele consumuri: 10...15m^3 O_2/t, 0,5...0,6 m^3N_2/t, 10...17 kg CaC_2/t și 1,7 kg căptușeală/t.

Lucrarea [58] subliniază faptul că aceste instalații sînt răspîndite în S.U.A., Franța, F.R.G., Belgia, Italia.

Un procedeu de desulfurare a fontei, cu carbură de calciu, la evacuarea din cubilou, este prezentat și de către lucrarea [421]. Carbura de calciu este depozitată într-un buncăr, de unde, cu ajutorul unui alimentator cu vibrații, ajunge într-o oală de desulfurare, unde are loc barbotarea cu azot. După 20...60 s de la tratarea cu CaC_2, în proporție de 0,8...1,0% se realizează o scădere a sulfului de la 0,08...0,09% la 0,008...0,01%.

Temperatura fontei, în urma acestui tratament scade cu 20...25°C.

S-au construit instalații care prevăd utilizarea unor oale cu dop poros realizat dintr-un amestec pe bază de grafit și argilă, cu o durabilitate de 40—50 tratamente [396].

În oală se adaugă 1,5% amestec format din 70...80% CaC_2, 10...20% CaF_2 și 0,5...10% alte materiale, după care se introduce agentul de carburare, aerul comprimat sau azot. Acesta, la o presiune de 1,76 daN/cm², prezintă un consum de 0,2...0,25 m³/min.

O instalație de desulfurare continuă, de mare capacitate este prezentată în lucrarea [243]. Această instalație lucrează continuu 28...48 h, asigurînd o productivitate de 18 t/h fontă lichidă prelucrată. Este utilizată o oală cilindrică ($D/H = 1$), a cărei căptușeală conține 85% Al_2O_3, cu o durabilitate de 300...500 h.

Se utilizează carbură de calciu la o granulație sub 16 mm, în cantitate de 4,5 kg/t. Barbotarea este realizată de către azot, introdus la o presiune de 1,0...1,7 daN/cm², prin trei cărămizi poroase. Se obține o desulfurare de la 0,10% la 0,008...0,012% S. Concomitent în oală se adaugă praf de cocs (sub 15 mm), în proporție de 0,1...0,3%, pentru carburarea fontei.

Desulfurarea fontei cu ajutorul carburii de calciu, prin utilizarea unor gaze de barbotare, introduse prin dop poros este deosebit de răspîndită în majoritatea țărilor. Se mai pot aminti: Beater-Process utilizat în Japonia, care asigură reducerea sulfului de la 0,11% la 0,008%, Volianik-Process, prin care la o barbotare cu azot timp de 4 min și la un consum de CaC_2 de 0,75% sulful scade de la 0,1 la 0,001% etc. [62].

În țara noastră a fost stabilită o tehnologie care prevede desulfurarea fontei după același principiu, care a dat bune rezultate [20].

O altă metodă de utilizare a carburii de calciu o constituie introducerea acesteia *în jetul* de azot. Astfel, pot fi utilizate tuburi de grafit care, la o adîncime de 460 mm, introduc în fonta lichidă din oală un amestec de azot și carbură de calciu (13 kg/t). Se remarcă totuși faptul că o mare parte din CaC_2, în acest caz, va fi îndepărtată cu zgura [243].

Scanned with OKEN Scanner

Agitarea fontei, în vederea măririi contactului cu carbura de calciu poate fi realizată și pe cale *mecanică*.

În această categorie se încadrează utilizarea *agitatorului mecanic cu palete*, realizat în țara noastră de către ICSITPSC [377].

Această instalație este realizată în două variante, pentru oale de 400...800 kg și pentru oale de 5000 kg capacitate. Unele caracteristici ale acestor instalații sînt prezentate în tabelul 3.2 [384].

Tabelul 3.2

CARACTERISTICILE INSTALAȚIILOR DE DESULFURARE CU AGITATOR (ICSITPSC) [384]

Capacitatea oalei de desulfurare, în t	0,4...0,8	5
Turațiile agitatorului, în rot/min	56,4; 75,2; 114	46,5; 66,5; 93
Modul de reglaj pe înălțime	Manual, intermitent	Continuu, electric
Viteza de coborîre-ridicare, la reglaj, în mm/s	—	2,5
Înălțimea maximă de reglaj, în mm	150	200
Adîncimea maximă a agitatorului în oală, în mm	—	590
Modul de suspendare a instalației	Cu podul rulant	Cu macara pivotantă
Sarcina maximă de ridicare, în kg	—	1400
Putere motor acționare, în kW	2,2	13
Masa netă, în kg	480	5300

Fonta este evacuată din agregatul de elaborare la o temperatură de 1370...1500°C, iar după îndepărtarea zgurei este trecută în oala de desulfurare.

Capacul, împreună cu mecanismul de agitare se amplasează deasupra oalei de desulfurare și se potrivește înălțimea agitatorului astfel, încît paleta să fie cufundată 2/3 din înălțimea ei în fonta lichidă; dacă este rece paleta se preîncălzește cu flacără.

Carbura de calciu, în proporție de circa 1,2% din cantitatea de fontă supusă modificării, se introduce printr-un orificiu prevăzut în capac.

Scanned with OKEN Scanner

Timpul de amestecare recomandat este de 6,0 min [384].

Utilizarea unor oale prevăzute cu un mecanism de *vibrare* asigură o scădere a consumului de carbură de calciu cu circa 7 kg/t față de situația fără agitare [243].

3.4.2. Desulfurarea cu CaO

Un brevet francez (Nr. 2.194.780) prezintă o instalație pentru decarburarea și desulfurarea fontei în oală [145]. Cu ajutorul unei lance, în baie se suflă bioxid de carbon și pudră de oxid de calciu.

Instalația este compusă din oala de reacție propriu-zisă, acoperită și prevăzută la partea superioară cu un orificiu special necesar introducerii lancei de insuflare a anhidridei carbonice lichide, precum și a dispozitivului de insuflare a puderi de oxid de calciu. Lancea utilizată este protejată în porțiunea scufundată în bae de o căptușeală refractară, care poate fi schimbată.

Decarburarea băii se realizează prin suflarea bioxidului de carbon. Înainte de începerea operației de decarburare se procedează la răcirea puternică a lancei de insuflare prin trecerea unui curent de anhidridă carbonică lichidă. Acest tratament este necesar pentru a preveni la maximum distrugerea porțiunii imersate a tubului și pentru a mări probabilitatea aducerii CO_2-ului, în stare lichidă cît mai aproape de suprafața băii.

Introducerea bioxidului de carbon în fonta lichidă determină reacția

$$\{CO_2\} + [C] = 2\ \{CO\} \qquad (3.1)$$

Introducînd aer sau oxigen la suprafața oalei cu fontă se realizează arderea monoxidului de carbon, rezultat din decarburare, conform reacției

$$2\ \{CO\} + \{O_2\} = 2\ \{CO_2\} + Q \qquad (3.2)$$

Efectul exoterm al reacției (3.2) asigură păstrarea fontei lichide la temperatură ridicată.

Agitarea violentă a băii, provocată de desfășurarea reacției (3.1), favorizează desfășurarea unui proces de desulfurare:

$$2\ CaO + Si + 2S \rightarrow 2\ CaS + SiO_2 \qquad (3.3)$$

$$CaO + C + S \rightarrow CaS + CO \qquad (3.4)$$

În vederea decarburării și desulfurării unei cantități de 7,0 t fontă a fost aplicat un tratament timp de 10 min, dintre care 6 min timp efectiv de insuflare.

Scanned with OKEN Scanner

Se utilizează bioxid de carbon la un debit de 16 kg/min și un consum de 0,85 kg CO_2/t, pentru scăderea carbonului cu 0,01%.

Pentru desulfurare se utilizează 1...1,5% CaO, 0,25...0,35% CaC_2 și 0,04...0,06% CaF_2, din cantitatea de fontă supusă tratamentului. Consumul de lance, utilizată la insuflare, este de 3 m/100 t de fontă [145]. Oxidul de calciu poate fi introdus în fonta lichidă și cu ajutorul *calcarului*.

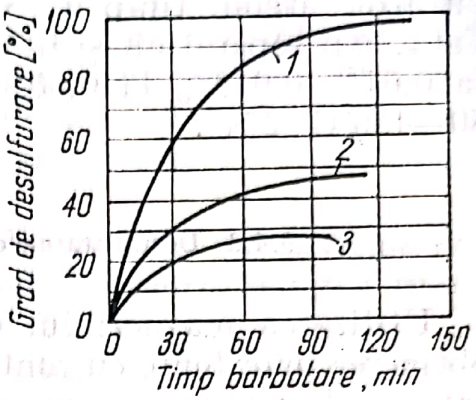


Fig. 3.10. Desulfurarea fontei cu calcar, la barbotarea cu gaze [274]:
1 — gaz metan; *2* — argon; *3* — aer.

În Anglia a fost stabilită o tehnologie de desulfurare în oală, care prevede utilizarea unui amestec format din 95% calcar și 5% fluorină, fonta fiind barbotată cu gaze. Zgura care rezultă este granulară, ușor de îndepărtat.

Cantitatea de calcar utilizată este de două ori mai mare decît cea de carbură de calciu, pentru a obține un același efect, dar costul desulfurării este mai mic, iar zgura rezultată este mai ușor de îndepărtat. Se obține un randament de desulfurare de pînă la 85% [48].

Barbotarea fontei cu ajutorul gazelor accelerează procesul de desulfurare și în cazul folosirii calcarului (fig. 3.10). Se cunostată că timpul necesar pentru desulfurare este mai îndelungat decît în cazul folosirii carburii de calciu, iar barbotarea fontei cu gaz metan asigură o eficiență sporită acestui tratament. Acest lucru este explicat de acțiunea dezoxidantă a carbonului și hidrogenului puși în libertate de gazul metan, care favorizează desulfurarea [274].

Oxidul de calciu poate fi utilizat și în asociere cu alte materiale cu acțiune desulfurantă.

Astfel, pentru desulfurarea unei fonte de cubilou (3,6% C, 2,03% Si, 0,54% Mn, 0,12% P), în cantitate de 25 t, s-au utilizat 100 kg Na_2CO_3 + 150 kg CaO. Barbotarea fontei a fost realizată prin suflarea de azot timp de 25 min. Conținutul de sulf a scăzut de la 0,099% la 0,031%, gradul de desulfurare atingînd 67%. Temperatura fontei a scăzut de la 1310°C la 1250°C. Consumul de azot a fost de 0,5 m^3/t iar presiunea acestuia de 2...8 at [274].

Pentru desulfurarea unei fonte elaborate într-un cuptor electric cu arc, prin aceeași metodă, a fost utilizată barbotarea fontei

Scanned with OKEN Scanner

cu azot, argon, timp de 5...10 min. S-au utilizat CaO, Na_2CO_3 CaC_2, atît separat cît și în diverse combinații. Sulful a scăzut de la 0,015—0,019% la 0,005—0,001%, iar temperatura fontei cu 80—150°C [274].

3.4.3. Desulfurarea cu magneziu

Utilizarea magneziului ca element de desulfurare urmărește obținerea unor fonte cu conținut scăzut de sulf, care vor fi modificate cu elemente mai scumpe (de ex., ceriul) sau în cazul în care este necesară rafinarea fontei, aceasta urmînd să fie prelucrată ulterior.

Magneziul este un element cu mare afinitate față de sulf, dar produsele desulfurării (MgS) se îndepărtează greu în zgură, ceea ce duce la necesitatea menținerii fontei în oală (sau cuptor) pînă la îndepărtarea acestora [62, 106].

O serie de tehnologii propun utilizarea magneziului pentru rafinarea fontei de primă fuziune, destinată apoi obținerii fontelor modificate de înaltă calitate.

Tratarea fontelor în oală, cu 0,02...0,06% Mg, asigură o scădere a conținutului de sulf de la 0,16...0,072% la 0,011...0,053%. Pe de altă parte scade în mare măsură conținutul de gaze, care ajunge la valori de 0,0056%. Cantitatea de oxizi ai fontei scade pînă la 0,009%, calupurile de fontă neprezentînd zgură, impurități. Fenomenul de „ereditate" nu mai este prezent la fontele modificate [67].

3.5. Alierea fontelor cu grafit vermicular

3.5.1. Fonte cu grafit vermicular aliate cu aluminiu

Pentru obținerea unor fonte cu Si $< 0,2\%$ în cuptoare cu arc bazice a fost utilizată o încărcătură constituită din 50% deșeuri de oțel și 50% fontă de afinare, aluminiul fiind introdus la 1500...1540°C [182].

A fost obținut grafit lamelar, la C $> 3\%$ și Al $> 0,5\%$ și grafit nodular, prin modificarea cu magneziu și pămînturi rare.

Forme compacte de grafit, respectiv grafit nodular și vermicular au fost obținute și fără adaosuri de elemente nodulizante.

În cazul fontelor cu Si $< 0,2\%$ și Al $= 1,5...3,0\%$, variația conținutului de carbon determină obținerea diferitelor forme de

Scanned with OKEN Scanner

grafit: punctiform (2,2...2,4% C); nodular (2,4...2,7% C), vermicular (2,7%...3,0% C). Adaosul de materiale grafitizante, pe bază de siliciu (Si tehnic, Si Ca, FeSi) lărgesc domeniul de obținere a grafitului nodular. La conținuturi date de C și Al, pentru obținerea grafitului nodular sînt necesare cantități de 1,8...2,0% FeSi și numai 1,2...1,8% SiCa.

O caracteristică importantă a fontelor Fe-C-Al o constituie numărul mare de celule eutectice (peste 600 CE/cm²), de circa 10 ori mai mare decît în cazul aliajelor Fe-C-Si.

Aliajele Fe-C-Al au tendința de a solidifica în sistemul metastabil, cu formarea unor carburi complexe de tipul Fe_3AlC_x, dar adaosuri de modificatori grafitizanți conduc la obținerea unei mase metalice ferito-perlitice.

Carburile complexe, prezente în structura fontelor Fe-C-Al, determină mărirea durității și rezistenței, dar înrăutățesc prelucrabilitatea.

În cazul în care grafitul este nodular, se obțin valori ale rezistenței de pînă la 100 daN/mm², la o alungire de 4% și o reziliență de 4 daj/cm².

Fontele din sistemul Fe-C-Al, cu grafit nodular și vermicular, prezintă o serie de proprietăți tehnologice superioare fontelor similare, din sistemul Fe-C-Si, aliate cu Cr, Ni, Mo și Ti: rezistență la șoc termic, oxidare, uzare.

Astfel de fonte se utilizează la turnarea segmenților de piston și a cilindrilor motoarelor cu ardere internă, în locul fontelor cu grafit nodular fosforoase (tip Konig-R.F.G.).

De asemenea, sînt utilizate pentru pistoane și segmenții de piston la mașinile de turnat sub presiune a aliajelor de Zn și Al, în aceste cazuri obținîndu-se durabilități de 5—6 ori mai mari decît în mod obișnuit.

Matrițele din aliajele Fe-C-Al înlocuiesc pe cele din oțel.

Creuzetele din fonte Fe-C-Al pentru topirea aluminiului și plăcile de la cuptoarele de tratament termic au o durată de utilizare cu 30...100% mai mare decît cele din fonte Fe-C-Si aliate.

Fontele din sistemul Fe-C-Al sînt utilizate cu succes pentru turnarea lingotierelor, piese din componența conveioarelor supuse la uzare, cochile pentru mașini centrifuge de turnat etc.

Prin modificarea cu 1% SiCa a unor fonte cu 2,5...2,8% C, max. 0,6% Si, 1,8...2,8% Al, a fost obținut grafit vermicular, la o masă metalică perlitică, ceea ce asigură o rezistență la încovoiere de min. 800 N/mm² (tabelul 3.3). Aceste fonte sînt caracterizate de proprietăți de antifricțiune superioare fontelor cenușii, cu grafit lamelar.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.3

FONTE CU GRAFIT VERMICULAR ALIATE CU ALUMINIU ȘI MODIFICATE CU 1% SiCa [238]

Numărul fontei	Compoziția chimică, %						R_t N/mm²	HB	Observații
	C	Al	Si	Mn	P	S			
1	3,43	1,96	0,52	0,52	0,082	0,028	380	207	—
2	3,19	1,47	0,55	0,56	0,085	0,026	650	207	—
3	3,21	2,52	0,49	0,50	0,086	0,031	690	229	—
4	2,92	2,03	0,53	0,49	0,081	0,032	850	255	—
5	2,89	2,89	0,56	0,57	0,083	0,029	770	241	—
6	2,61	2,41	0,52	0,49	0,083	0,028	960	262	—
7	2,59	1,52	0,53	0,57	0,086	0,030	800	255	—
8	2,66	3,53	0,56	0,52	0,082	0,033	770	255	—
9	2,29	2,97	0,49	0,59	0,082	0,032	680	375	Albire
10	2,30	1,98	0,52	0,58	0,081	0,030	750	388	Albire

Fonte cu 3,2...4,0% C, 0,8...1,2% Si, 1,0...1,5% Mn, 1,2...1,5% Al, max. 0,08% S și max. 0,2% P sînt caracterizate prin plasticitate și termostabilitate ridicată. Aceste fonte au, la temperatura de 20°C, $R_m = 330$ N/mm², $A = 4,5\%$ și 180 HB, iar la 700°C, $R_m = 150$ N/mm², și $A = 5,0\%$ [38].

Caracteristici mecanice ridicate sînt obținute și în cazul în care fontele cu aluminiu sînt modificate cu magneziu, realizîndu-se grafit vermicular.

Astfel, un patent belgian propune fonte cu 1...3% Al, 0...1% Si, 2...4% C, modificate cu magneziu. Proprietăți ridicate sînt obținute și în cazul în care modificarea are loc cu 0,3...2,0% Ca, Ba, Sr. Ca valori optime se recomandă: 0,75% Si, max. 0,7% Mn, max. 0,05% S, max. 0,1% P [89].

Fonte cu grafit vermicular au fost obținute și în cazul în care modificarea a avut loc cu 0,5% MgCe. La o compoziție chimică de 3,43% C, 0,94% Si, 0,10% Mn, 0,019% P, 0,005% S, 2,49% Al și 0,056% Mg și la o structură formată din 95% F și 5% P, s-au obținut următoarele caracteristici mecanice: $R_m = 372$ N/mm², $R_{0,2} = 258$ N/mm², $A = 8,9\%$ și $HB = 142$. Conductivitatea termică a acestor fonte este de 33 W/m.K la 150°C și de 35 W/m.K la 350°C [255].

La un conținut de 2,0...3,5% Al, modificarea cu ceriu a condus la obținerea unei structuri feritice sau ferito-perlitice, cu grafit

Scanned with OKEN Scanner

compact, care asigură o rezistență la uzare în condiții de frecare uscată [160].

Modificarea cu 0,2% Ce-MM și postmodificarea cu 0,2% FeSi75 a unor fonte cu 3,0% C, 4,0% Al, 4,0% Si, 4,6% Cu, 0,93% Mn, 0,093% P și 0,040% S determină formarea grafitului vermicular. Aceste fonte au o rezistență la tracțiune de 480 N/mm² și o duritate de 340 *HB* [152].

Modificarea cu Ce-MM a unor fonte cu 4% Al, 4% Si și 4% Cu a condus la obținerea unei rezistențe la tracțiune de 480 N/mm² asigurîndu-se în același timp o bună prelucrabilitate [239].

Fontele din sistemul Fe-C-Al au o mare tendință de formare a oxizilor (Al_2O_3). Acești oxizi pot constitui surse pentru oxidarea carbonului, conform reacției :

$$(Al_2O_3) + 3\,[C] = 2\,[Al] + 3\,\{CO\} \qquad (3.5)$$

Temperatura de echilibru a reacției (3.5) se poate calcula cu relația [415]:

$$T_c = \frac{57\,920}{27{,}41 + \lg \dfrac{f_C^3 \cdot [C]^3}{f_{Al}^2 \cdot [Al]^2}} \quad [°K]. \qquad (3.6)$$

La $T > T_c$ are loc reacția de oxidare a carbonului, în timp ce la $T \leqslant T_c$ se oxidează aluminiul, cu formarea peliculei de oxizi.

În fig. 3.11 este prezentată temperatura de echilibru (T_c), la valori de 2,0...4,0% C și 1...3% Al [415].

Peliculele de oxizi se formează la toate temperaturile uzuale, temperatura T_c putînd fi micșorată numai printr-o dezoxidare avansată a fontei.

Introducînd în cuptor, la 1550... ...1570°C, după îndepărtarea zgurei, 0,7% silicocalciu, se realizează o îndepărtare avansată a peliculei de oxizi, datorită scăderii oxigenului sub valoarea de echilibru cu aluminiul, la temperatura dată. Cele mai bune rezultate au fost obținute în cazul în care 30...40% SiCa au fost adăugate înainte de asimilarea aluminiului, restul cantității de SiCa adăugîndu-se după topirea aluminiului.

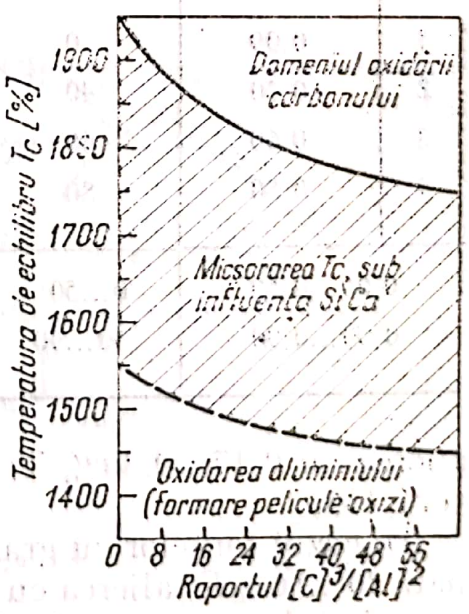


Fig. 3.11. Valoarea temperaturii de echilibru a reacției (Al_2O_3 + 3 C = 2 Al + 3 CO) [415].

Scanned with OKEN Scanner

3.5.2. Alierea în vederea măririi cantității de perlită

Fontele cu grafit vermicular au o sensibilitate ridicată la formarea structurii feritice, astfel că pentru obținerea unor proporții ridicate de perlită este necesar să se apeleze la utilizarea unor elemente de aliere cu acțiune perlitizantă.

Alierea fontelor cu grafit vermicular constituie o cale importantă de îmbunătățire a proprietăților acestui nou tip de fontă [392].

În vederea stabilizării perlitei în masa metalică de bază modificatorii utilizați la obținerea fontelor cu grafit vermicular pot conține elemente cum ar fi Mn, Cr, Sn, Cu etc. Masa metalică de bază feritică este obținută prin minimalizarea conținutului acestor elemente în compoziția modificatorilor și a materialelor folosite în încărcătura sau prin tratament termic [333].

Conținutul de perlită al fontei cu grafit vermicular este direct dependent de valoarea *manganului*. În cazul unor fonte cu 3,6% C, 2,46% Si, 0,017% P, 0,009% S, și 0,001% Ti, mărirea conținutului de mangan duce la creșterea proporției de perlită din structură (tabelul 3.4) [154].

Tabelul 3.4

INFLUENȚA MANGANULUI ASUPRA CANTITĂȚII DE PERLITĂ LA FONTELE CU GRAFIT VERMICULAR [154]

Nr. crt.	Mangan, %	Perlită, %
1	0,09	0
2	0,30	40
3	0,60	60
4	0,80	80
	0,09...0,50	0...50
	0,50...0,90	50...90

Cuprul este un element utilizat tot mai frecvent la alierea fontelor cu grafit vermicular [2, 159, 191, 216, 285, 295, 332, 353].

Alături de cupru se utilizează elemente de aliere cu acțiune perlitizantă, cum ar fi Sn, Sb, V, Ni, As.

În cazul utilizării fontelor cu conținut scăzut de mangan (<0,10% Mn), alierea cu pînă la 1,0% Cu nu afectează, practic, structura feritică. La conținuturi de 0,50...0,60% Mn, proporții mai mari de perlită în structură (25...70% P) au fost realizate prin alierea cu 0,5...0,6% V, 1,04% Cu sau 0,44% V + 1,13% Cu. În toate cazurile, alierea cu 0,17...0,30% Ti favorizează apariția perlitei în structură [353].

În cazul fontelor cu grafit vermicular, care conțin în stare turnată 40...50% F, alierea cu Cu, Sb, Sn, a permis obținerea a 70% P, ajungînd la 90...95% P după normalizare. Se consideră că obținerea unei structuri cu 100% P în stare turnată constituie încă o problemă [2].

Scanned with OKEN Scanner

Alierea cu 0,7% Cu a fontelor cu grafit vermicular, cu 0,013...0,023% Mg_{rem} și 0,10% Ti a condus la creșteri importante ale caracteristicilor mecanice, anulînd efectul măririi grosimii de perete [216].

Fontele cu grafit vermicular obținute prin modificarea cu 0,5...0,6% FeSiCaMgTiCe, aliate cu 0,4...0,8% Cu și 0,10% Sn au R_m = = 420...500 N/mm² și HB = 170...230 [185].

La un conținut de 0,70% Mn, alierea cu 0,2% Sb și 0,2% Cu asigură obținerea a 60% P, în cazul turnării segmenților de piston [191].

Se remarcă faptul că proprietățile fontelor cu grafit vermicular sînt îmbunătățite în urma alierii cu Ti, Sn, Sb, As, ceea ce nu este posibil la fontele cu grafit nodular, datorită acțiunii antimodificatoare a acestor elemente.

Obținerea unei structuri perlitice la fontele cu grafit vermicular este posibilă prin aliere cu staniu (R_m = 400...550 N/mm²) sau cu o asociație Sn + Cu, caz în care se obține R_m = 500 N/mm², A = 1% [168].

Structura perlitică a fost obținută și la 3,52% C, 2,25% Si, 0,40% Mn, 0,054% P, 1,47% Cu, 0,015% Mg, la un grad de saturație în carbon S_c = 1,02 [104].

Utilizînd modificatori complecși din sistemul FeSiCaMgCe, cu 8,30...9,95% Mg, 8,0...13,2% Ca, 38,2...47,2% Si, 1,25...2,0% PR, la care se mai adaugă și 21,8% Cu, s-au obținut fonte cu grafit vermicular și nodular aliate, cu caracteristici mecanice deosebit de ridicate [159].

Fontele cu grafit vermicular, cu 0,55...0,70% Cu, 0,07% Sb, au R_m = 590...682 N/mm², A = 2,4...7,2% HB = 223...248.

Cuprul prezent în compoziția modificatorului conduce la obținerea a o serie de efecte pozitive: scade activitatea termodinamică a magneziului în modificator, se micșorează efectul piroforic al reacției de modificare, crește densitatea modificatorului și scade temperatura sa de topire, astfel că fonta poate fi modificată la temperaturi scăzute (1330...1350°C). Pot fi obținute fonte ferito-perlitice și perlitice.

Asimilarea magneziului în cazul unui modificator fără cupru (*1*) și cu 21,8% Cu (*2*), funcție de temperatură, este prezentată în fig. 3.12 [195].

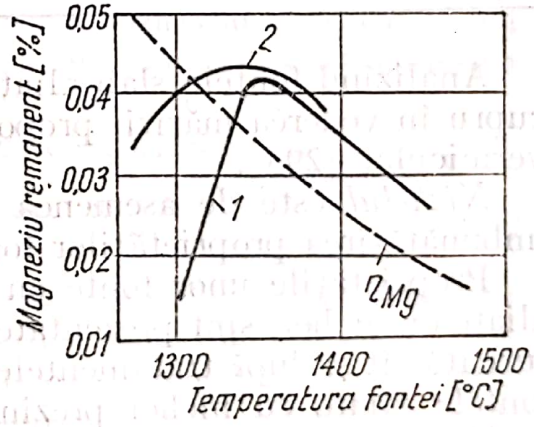


Fig. 3.12. Asimilarea magneziului, funcție de temperatura de modificare [195]:

1 — modificator JKMK — 6 (8,1% Mg, 5,8% Ca, 50% Si, 2% PR); *2* — modificator JKMK —4M (8,3% Mg, 8% Ca, 38% Si, 1,2% PR, 21,8% Cu).

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.5

INFLUENȚA NICHELULUI ASUPRA PROPRIETĂȚILOR FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR [355]

Caracteristica	Nealiate			Aliat cu 1,5% Ni		
	Stare turnată	Tratament termic de feritizare*)	Tratament termic de perlitizare	Stare turnată	Tratament termic de feritizare	Tratament termic de perlitizare**
Compoziția chimică, %						
C		3,50			3,40	
Si		1,90			1,98	
Mn		0,32			0,40	
Ni		—			1,53	
Mg		0,016			0,023	
Ti		0,35			0,28	
Ce		0,005			0,005	
Caracteristici mecanice						
R_m, în N/mm²	350	294	423	427	333	503
$R_{0,2}$, în N/mm²	263	231	307	328	287	375
A, în %	2,8	5,5	2,5	2,5	6,0	2,0
HB	153	121	207	196	137	235
$R_{0,2}/R_m$	0,75	0,79	0,73	0,77	0,86	0,75

*) Feritizare prin încălzire 2h la 900°C, răcire la 690°C, menținere 12 h și răcire în aer.
** Perlitizare — 2h la 900°C, răcire în aer.

Analizînd fontele slab aliate s-a constatat utilizarea alierii cu cupru în vederea măririi proporției de perlită în fontele cu grafit vermicular [295].

Nichelul este de asemenea un element de aliere care asigură îmbunătățirea proprietăților fontelor cu grafit vermicular.

Proprietățile unor fonte cu grafit vermicular (probe 25 mm), aliate cu nichel, sînt prezentate în tabelul 3.5 [355]. Atît în stare turnată cît și după tratamentele termice de feritizare și perlitizare, fontele aliate cu nichel prezintă proprietăți mult îmbunătățite.

Utilizarea concomitentă a nichelului și molibdenului contribuie la realizarea unor îmbunătățiri remarcabile ale proprietăților fontelor cu grafit vermicular [256].

Scanned with OKEN Scanner

4. PROPRIETĂȚILE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR

Rezultatele obținute în special din ultimii ani, au permis conturarea unei poziții distincte a fontei cu grafit vermicular în marea familie a fontelor de turnătorie, respectiv a fontelor cu grafit lamelar, lamelar modificat, nodular, a fontelor maleabile, aliate și nealiate.

4.1. Proprietăți mecanice

4.1.1. Rezistența și plasticitatea

Dimensiunile separărilor de grafit și în special compactitatea acestora influențează în mare măsură gradul de concentrare a tensiunilor și deci însăși proprietățile fontei.

Se utilizează un *indice* de caracterizare a mărimii grafitului, calculat cu relația [153]

$$I_g = \frac{\Sigma a_i \cdot Z}{L} \cdot 10^{-3}, \qquad (4.1)$$

în care: Σa_i este suma dimensiunilor maxime sau diametrul nodulelor, în unități scală microscop; Z — valoarea unei unități scală microscop, în μm; L — lungimea porțiunii probei analizate, în mm.

Eroarea relativă de determinare este exprimată cu relația:

$$\delta_i = \frac{I_{gi} - I_g}{I_g} \cdot 100 \quad [\%], \qquad (4.2)$$

în care: I_{gi} este indicele grafitului în intervalul „i"; I_g — valoarea medie a indicelui I_g, în 40 de intervale (lungimea totală de 120 mm).

Pentru a obține o siguranță ridicată (eroare de max. 10%), este necesară analiza dimensiunilor separărilor de grafit pe următoarele distanțe: 120 mm (Gl), 90 mm (Gv) și 45 mm (Gn). Indicele grafitului (I_g) influențează în mare măsură valorile rezistenței la tracțiune și încovoiere (fig. 4.1), corelațiile stabilite fiind:

$$R_m = 53{,}65 - 29{,}57 \cdot I_g \quad [\text{daN/mm}^2] \quad (r = -0{,}87); \qquad (4.3)$$

$$R_i = 92{,}6 - 46{,}9 \cdot I_g \quad [\text{daN/mm}^2] \quad (r = -0{,}77). \qquad (4.4)$$

Scanned with OKEN Scanner

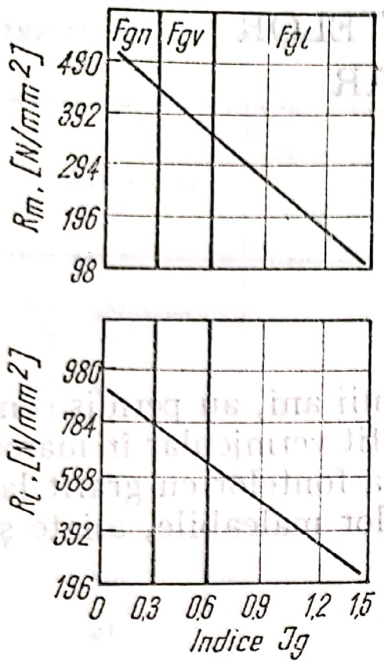


Fig. 4.1. Dependența caracteristicilor mecanice de valoarea indicelui grafitului I_g [153].

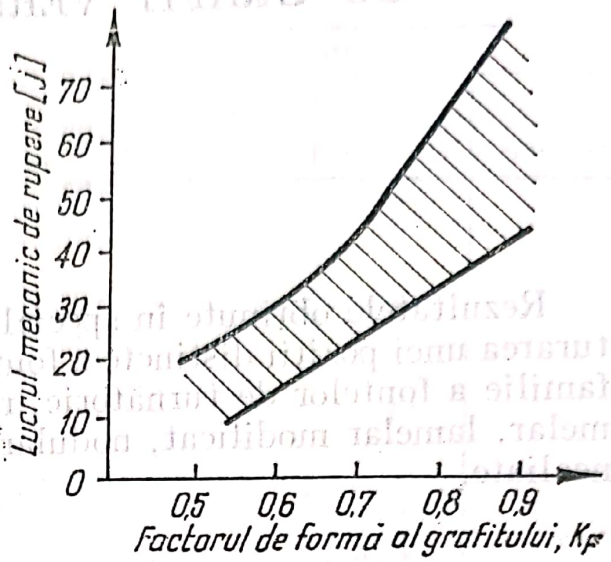


Fig. 4.2. Influența gradului de compactitate a grafitului vermicular asupra caracteristicilor mecanice [298].

Micșorarea valorii indicelui grafitului I_g are un efect pozitiv asupra proprietăților mecanice, datorită faptului că se realizează o scădere a efectului de concentrare a tensiunilor, are loc o micșorare de 2...3 ori a numărului de separări de grafit, precum și o reducere de 6...7 ori a întinderii lor pe aceeași lungime măsurată [153].

Caracteristicile grafitului vermicular, respectiv lungimea și grosimea acestuia, modul de repartizare în structura fontei, uniformitatea dimensională etc, influențează în mare măsură proprietățile fontei.

Astfel, creșterea lungimii și micșorarea grosimii separărilor de grafit vermicular, respectiv micșorarea gradului de compactitate al acestora (K_f) determină înrăutățirea proprietăților mecanice (fig. 4.2).

Caracteristicile fontelor cu separări de grafit vermicular de tipul *I*, *II*, *III* (v. fig. 1.1) sînt prezentate în tabelul 4.1 [306, 307].

Fontele cu grafit vermicular, cu pînă la 30% Gn, sînt caracterizate de caracteristici mecanice ridicate, atît în ceea ce privește rezistența cît și plasticitatea (tabelul 4.2) [9].

În cazul unor fonte cu grafit vermicular, cu 10% P, au fost obținute următoarele caracteristici mecanice: R_m = 320 N/mm²;

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.1

CARACTERISTICILE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR ÎN FUNCȚIE DE GRADUL DE COMPACTITATE A GRAFITULUI [307]

Tipul grafitului vermicular	Caracteristici dimensionale			Proprietăți mecanice		
	Lungime maximă L, µm	Grosime maximă g, µm	Raport L/g	Rezistență la tracțiune R_m, N/mm²	Alungire A, %	Duritatea HB
I	20	10	2... 4	300...450	2...5	150...240
II	150	50	2... 5	300...500	3...9	150...240
III	150	20	3...10	300...450	1,0...3,5	150...250

Tabelul 4.2

CARACTERISTICI MECANICE ALE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR CU PÎNĂ LA 30% Gn [9]

Caracteristica grafitului	Raportul Gv/Gn, %		
	100...90 / 0...10	90...80 / 10...20	80...70 / 20...30
Rezistența R_m, în N/mm²	320...380	380...450	450...500
Alungirea A, în %	2... 5	2... 6	3... 6

$R_{0,2} = 265$ N/mm², $A = 5{,}6\%$, $HB = 170$ și $R_{-1} = 170$ N/mm². Mărirea cantității de element modificator (Ce) a condus la obținerea a 70% Gv și 30% Gn, masa metalică de bază conținînd însă în acest caz 60% P, caracteristicile mecanice devenind: $R_m = 470$ N/mm², $R_{0,2} = 370$ N/mm², $A = 3{,}2\%$, $HB = 197$, $R_{-1} = 210$ N/mm². Deși caracteristicile de rezistență au fost îmbunătățite, alungirea a scăzut, din cauza micșorării cantității de ferită din structură [2].

Mărirea în continuare a proporției de grafit nodular determină schimbări în valoarea proprietăților fontelor, aceste schimbări fiind însă legate și de variația componenței masei metalice, cunoscut fiind faptul că în cazul grafitului vermicular, cantitatea de ferită din structură este mai mare [308, 319].

La fontele cu grafit vermicular, cu 30...50% Gn, se semnalează valori superioare ale acestor proprietăți mecanice [186]. Rezultate similare se constată și în cadrul lucrării [298].

În cazul modificării cu magneziu, la un conținut de max. 40% Gn, au fost obținute $R_m = 340...400$ N/mm², $A = 2...4\%$, în timp

Scanned with OKEN Scanner

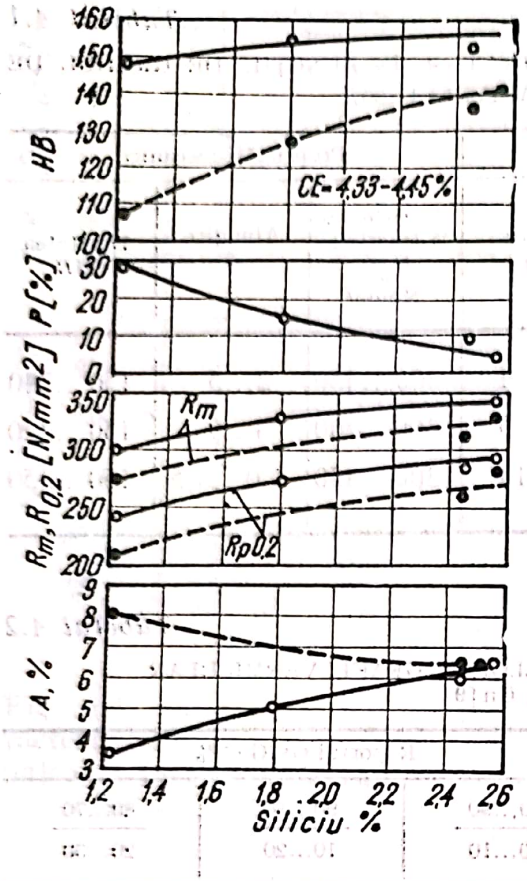
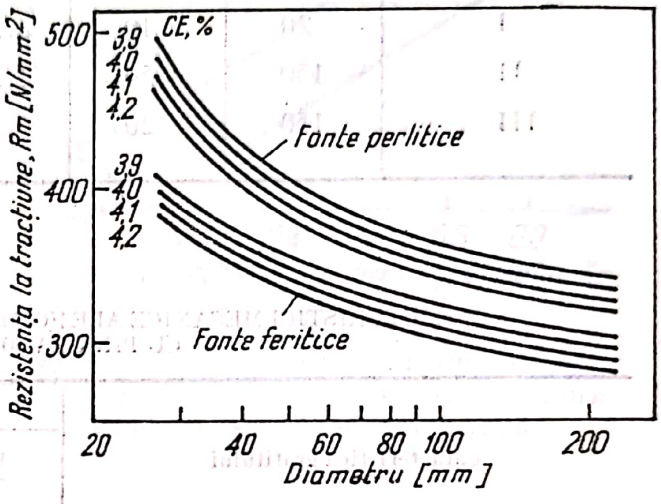


Fig. 4.3. Influența siliciului asupra structurii și proprietăților fontelor cu grafit vermicular, în stare turnată (—) și după recoacere (— — —) [380].

Fig. 4.4. Influența grosimii de perete și a carbonului echivalent asupra rezistenței fontelor cu grafit vermicular, feritice și perlitice [333].



ce la mărirea proporției de grafit nodular pînă la 70%, caracteristicile au crescut la $R_m = 500...600$ N/mm² și $A = 5...6\%$ [141].

Compoziția chimică constituie un factor important, care influențează proprietățile tuturor fontelor turnate. Se constată însă că în cazul fontelor cu grafit vermicular, proprietățile mecanice sînt afectate în mai mică măsură la creșterea valorii carbonului echivalent, apropriindu-se, din acest punct de vedere mai mult de fontele cu grafit nodular.

Siliciul, conducînd la schimbări importante în componența masei metalice de bază, influențează proprietățile fontelor, atît în stare turnată cît și după tratament termic (fig. 4.3.) [380.]

Influența concomitentă a carbonului echivalent și a grosimii de perete asupta rezistenței fontelor cu grafit vermicular este prezentată în fig. 4.4 [333].

La o masă metalică de bază constantă, rezistența la tracțiune prezintă scăderi ce nu depășesc 40% la o creștere a grosimii de perete de la 30 la 200 mm, în timp ce plasticitatea fontei este puțin afectată.

La creșterea grosimii de perete de la 12,5 la 200 mm, în cazul fontelor cu grafit vermicular, obținute prin modificarea cu Ce-Y-SiMM [2] rezistența la tracțiune scade de la 450 la 320 N/mm² (25...30%), în timp ce la fontele sintetice cu grafit lamelar, deja

Scanned with OKEN Scanner

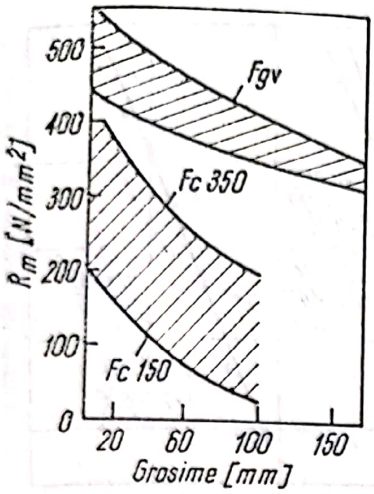


Fig. 4.5. Variația cu grosimea de perete a rezistenței la tracțiune a fontelor cu grafit lamelar și vermicular [2].

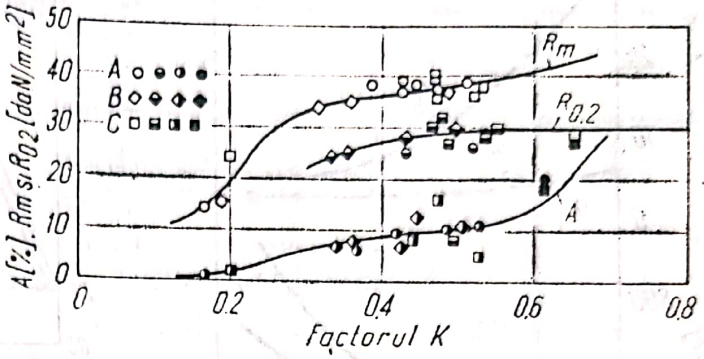


Fig. 4.6. Influența factorului de formă a grafitului K asupra caracteristicilor mecanice ale fontelor [413]:

A — modificare cu FeSiTiMgCe; *B* — modificare FeSiMgCe; *C* — modificare cu FeSiTiMgCe.

la 100 mm rezistența a scăzut la jumătate și nu depășește 200 N/mm² (fig. 4.5).

Creșterea grosimii de perete determină micșorarea rezistenței fontei datorită înrăutățirii compactității grafitului. Grosimea de perete influențează factorul de formă a grafitului K (raportul între suprafața grafitului și cea a cercului circumscris) și rezistența la tracțiune [413]. Fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate de valori $K = 0{,}35...0{,}55$.

Mărirea gradului de compactitate a grafitului, respectiv creșterea valorii factorului de formă K asigură îmbunătățirea proprietăților mecanice ale fontei (fig. 4.6) [413]. Fontele cu grafit vermicular cu $K = 0{,}35...0{,}55$ au $R_m = 350...400$ N/mm², $R_{0,2} = 260...$ ...300 N/mm² și $A = 7...11\%$.

Atît rezistența cît și alungirea fontelor sînt influențate în mare măsură de componența masei metalice de bază. În cazul unor fonte cu grafit vermicular, cu 3,6% C, 2,45% Si, 0,017%P, 0,009%S, 0,001%Ti, la un conținut de mangan de 0,09...0,50% Mn a fost obținută 0...50%P iar la 0,50...0,90% Mn, 50...90%P [154]. Influența cantității de perlită asupra rezistenței și alungirii fontelor cu grafit nodular și vermicular este prezentată în fig. 4.7 [154]. Alungirea este cea mai mult afectată de proporția de perlită, dar la fonta cu grafit vermicular această influență este mai puțin evidentă, la acest tip de fontă și rezistența la tracțiune fiind mai puțin dependentă de cantitatea de perlită. Se poate remarca faptul că limita de curgere a celor două tipuri de fonte prezintă valori apropiate și o dependență similară față de cantitatea de perlită.

Scanned with OKEN Scanner

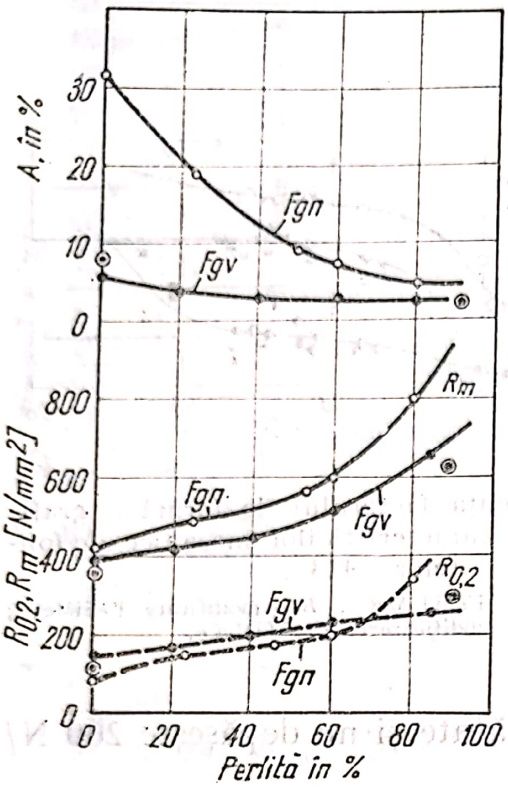
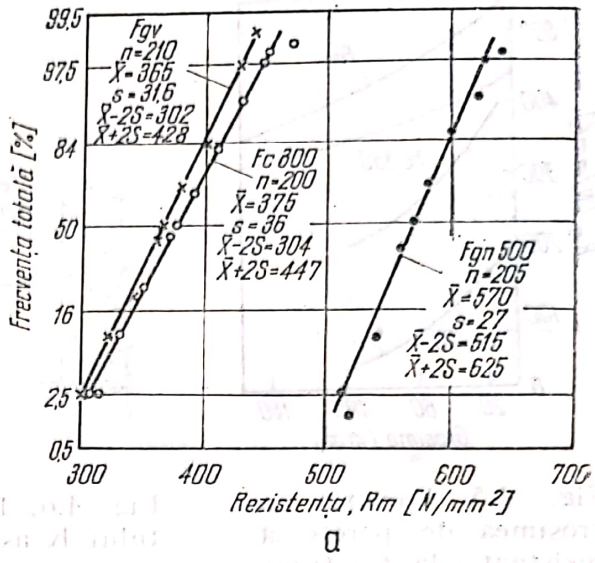


Fig. 4.7. Influența proporției de perlită asupra rezistenței și alungirii fontelor cu grafit nodular și vermicular [154].



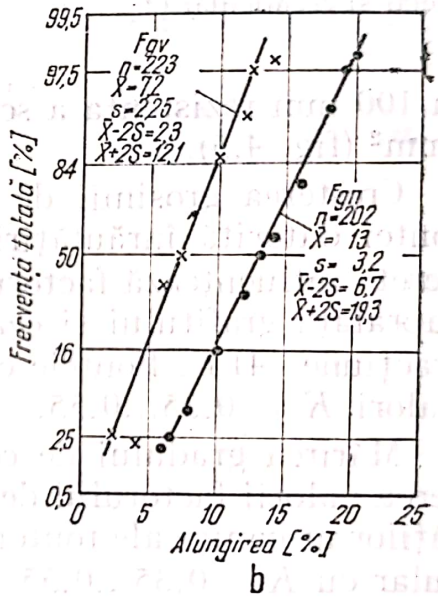


Fig. 4.8. Frecvența totală a distribuției valorilor rezistenței (*a*) și alungirii (*b*) ale fontelor cu diferite forme de grafit [300].

În cazul turnării chiulaselor pentru motoarele Diesel, se constată frecvențele distribuției valorilor pentru rezistența la tracțiune și alungire prezentate în fig. 4.8 [300].

Corelația între limita de curgere și alungire a fontelor cu grafit vermicular, cu și fără cementită liberă, este prezentată în fig. 4.9, comparativ cu situația înregistrată la fontele cu grafit nodular (condiții de minimum) [216].

Analizînd rezistența la compresiune (R_c) a fontelor cu grafit vermicular, se constată [256] existența următoarei corelații cu rezistența la tracțiune (R_m):

$$R_c = 3{,}2 \times R_m \qquad (4.5)$$

Scanned with OKEN Scanner

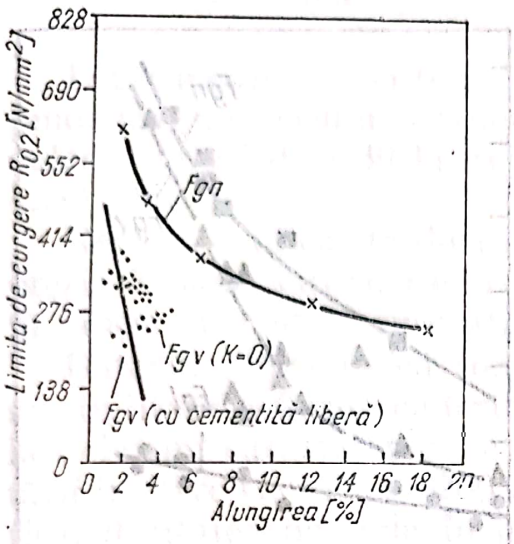


Fig. 4.9. Corelația între limita de curgere ($R_{0,2}$) și alungirea fontelor modificate [216].

Tabelul 4.3

COMPORTAREA LA COMPRESIUNE ȘI TRACȚIUNE A Fgv ȘI Fgn [256]

Caracteristica	Fgv	Fgn	
Rezistența la tracțiune, R_m, în N/mm²	380	370	420
Limita de curgere la tracțiune, în N/mm²			
0,1% deformare	246	224	261
0,2% deformare	242	236	273
Limita de curgere la compresiune, în N/mm²:			
0,1% deformare	322	247	284
0,2% deformare	350	250	287

Interes practic capătă nu numai valorile rezistenței la tracțiune și compresiune cît mai ales limitele de curgere în cazul celor două solicitări (tabelul 4.3) [256].

Pentru 0,1% deformare remanentă, diferența între valorile limitei de curgere la compresiune și tracțiune este de 76 N/mm² la fontele cu grafit vermicular, în timp ce în cazul fontelor cu grafit nodular această diferență este de numai 13...23 N/mm².

Comportarea diferită, la tracțiune și compresiune, a fontelor cu grafit vermicular, reiese și din curbele tensiune-deformație, prezentate în fig. 4.10 [256].

Experimentările efectuate de către autorii acestei lucrări pe probe (⌀15×20 mm) au scos în evidență faptul că rezistența la compresiune a fontelor cu grafit vermicular este mai apropiată de cea a fontelor cu grafit lamelar, la o masă metalică feritică, dar se apropie de fontele cu grafit nodular la conținuturi ridicate de perlită în structură (fig. 4.11).

În cazul unor fonte cu 70%P, variația rezistenței la compresiune în funcție de scurtarea procentuală la rupere este prezentată în fig. 4.12. Influența perlitei asupra valorii scurtării la rupere reiese din fig.4.13.

Analizînd influența grafitului asupra proprietăților mecanice ale fontelor feritice cu grafit vermicular, nodular și lamelar, cu 3,34...3,54%C și 2,55...2,84%Si, se constată că rezistența la compresiune depinde în mai mică măsură de forma grafitului [231].

Scanned with OKEN Scanner

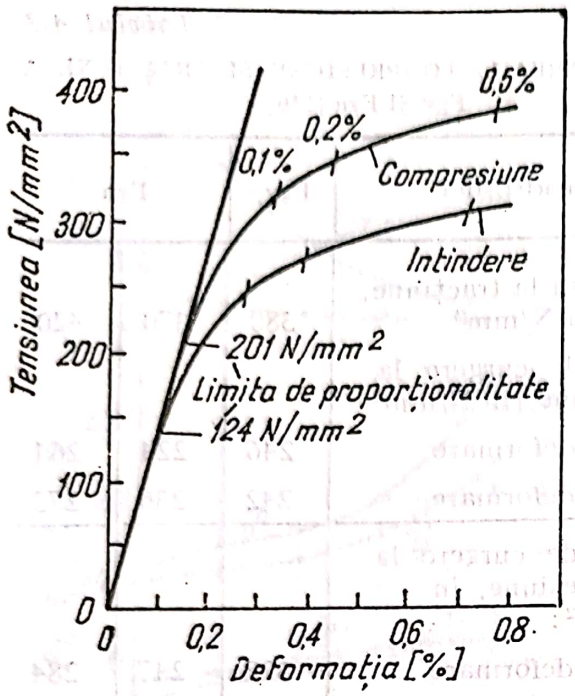


Fig. 4.10. Curbele tensiune-deformație, la tracțiune și compresiune în cazul fontelor cu grafit vermicular, după K.P. Palmer [256].

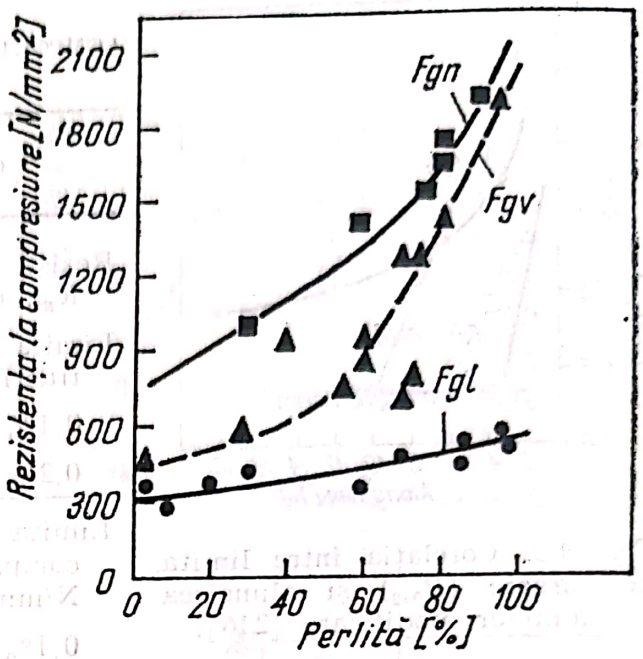


Fig. 4.11. Influența masei metalice asupra rezistenței la compresiune a fontelor cu diferite forme de grafit.

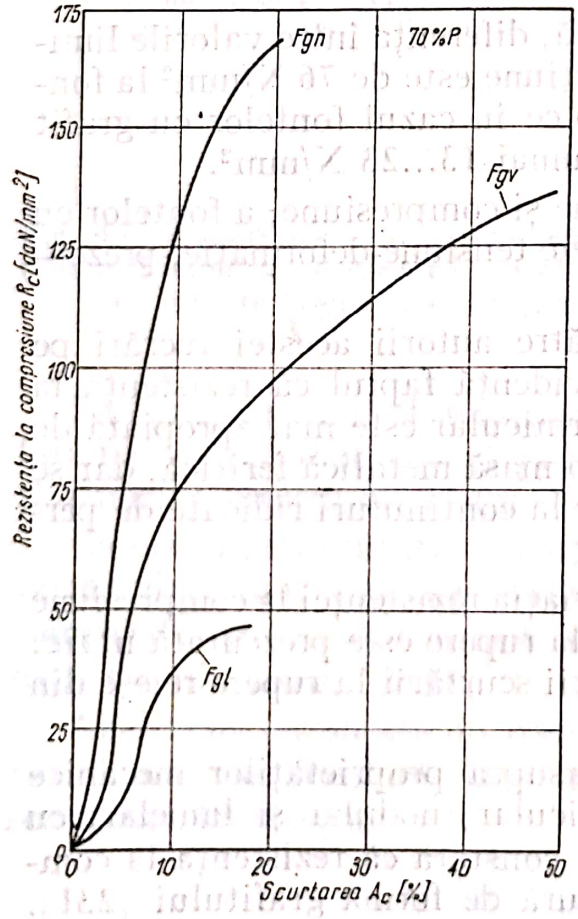
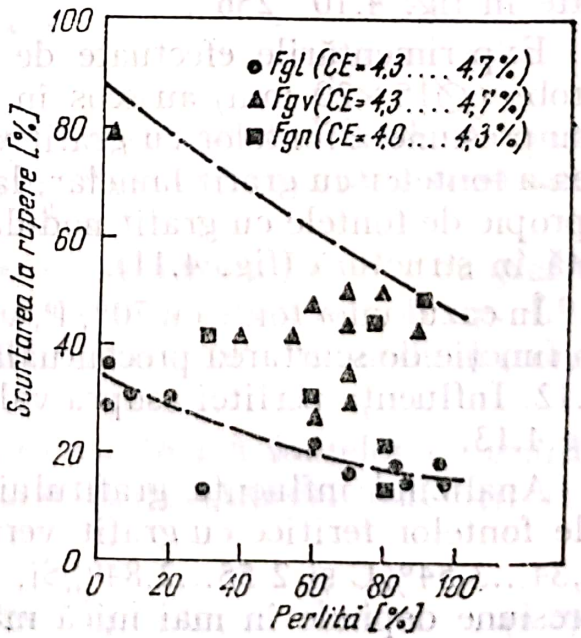


Fig. 4.12. Variația rezistenței la compresiune cu scurtarea procentuală la rupere.

Fig. 4.13. Influența perlitei asupra scurtării la rupere la compresiune.



Scanned with OKEN Scanner

Legătura între rezistența la tracțiune și duritatea fontelor depinde în mare măsură de tipul grafitului. Raportul R_m/HB prezintă valorile medii de 1,30 la Fgl, 2,08 la Fgv și 2,75 pentru Fgn (fig. 4.14) [380].

Rezultă deci că, la durități egale, fontele cu grafit vermicular prezintă valori superioare în ceea ce privește rezistența la tracțiune, în raport cu fontele cu grafit lamelar.

Datorită faptului că fontele cu grafit vermicular prezintă o sensibilitate la formarea feritei, superioară fontelor cu grafit nodular, ele sînt caracterizate, în general, prin valori scăzute ale durității în stare turnată (<200 HB). La o structură predominant feritică, duritatea depinde în mare măsură de conținutul de siliciu al fontei.

Creșterea grosimii de perete, de la 30 la 200 mm, afectează în mică măsură duritatea fontelor, respectiv cu 20...50 HB la o masă metalică feritică și cu 50...80 HB, în cazul unei structuri perlitice.

Corelația între rezistența la tracțiune și raportul între rezistența la tracțiune și duritatea fontelor este prezentată în fig.4.15 [300]. Dacă pentru fontele cu grafit lamelar, raportul R_m/HB este cuprins între 1,2...1,8 iar în cazul grafitului nodular se ating valori de 2,0...3,2, fontele cu grafit vermicular au $R_m/HB = 1{,}75...2{,}75$.

În fig. 4.16 este prezentată influența carbonului echivalent asupra raportului între rezistența la tracțiune și duritatea

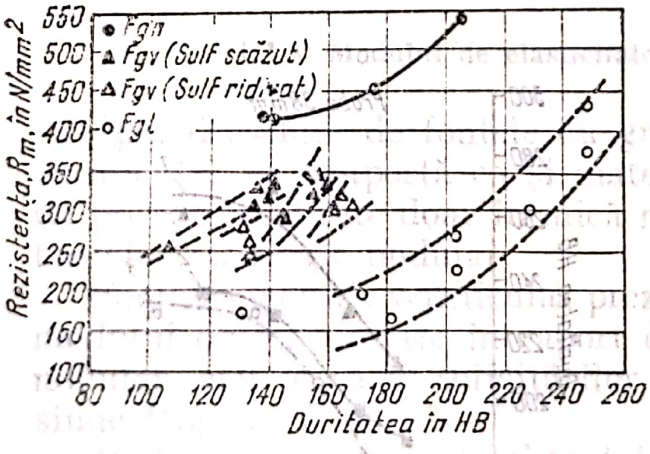


Fig. 4.14. Raportul rezistență la tracțiune-duritate în cazul fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular [380].

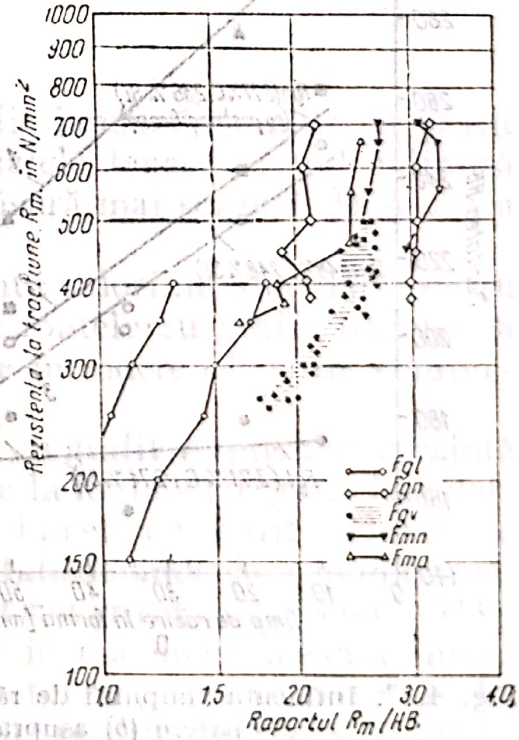


Fig. 4.15. Raportul între rezistență și duritate pentru diferite aliaje de turnătorie [300].

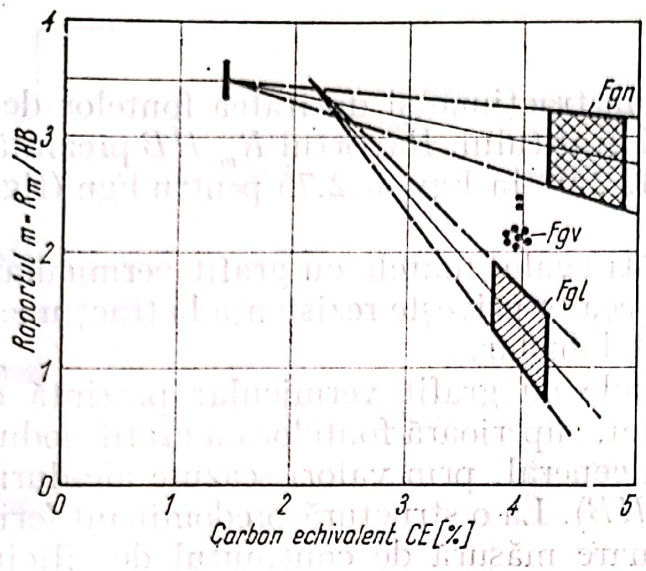


Fig. 4.16. Influența carbonului echivalent asupra raportului între rezistență și duritate [214].

fontelor, cu diferite forme de grafit [214]. Rezultă că indiferent de compoziția chimică, fontele cu grafit vermicular, ocupă o poziție intermediară între cele cu grafit lamelar și nodular, din punctul de vedere al raportului între rezistență și duritate.

Duritatea pieselor turnate este influențată în mare măsură de durata răcirii în formă, respectiv temperatura la care are loc dezbaterea (fig. 4.17) [297]. Dacă la fontele cu grafit lamelar dependența este scăzută, o influență mai mare se constată la cele cu grafit nodular, fontele cu grafit vermicular fiind mai apropiate de acestea.

Mărirea cantității de perlită din structura fontelor cu grafit vermicular determină creșterea valorilor durității, dependența fiind similară celei înregistrate la fontele cu grafit nodular (fig.4.18) [216].

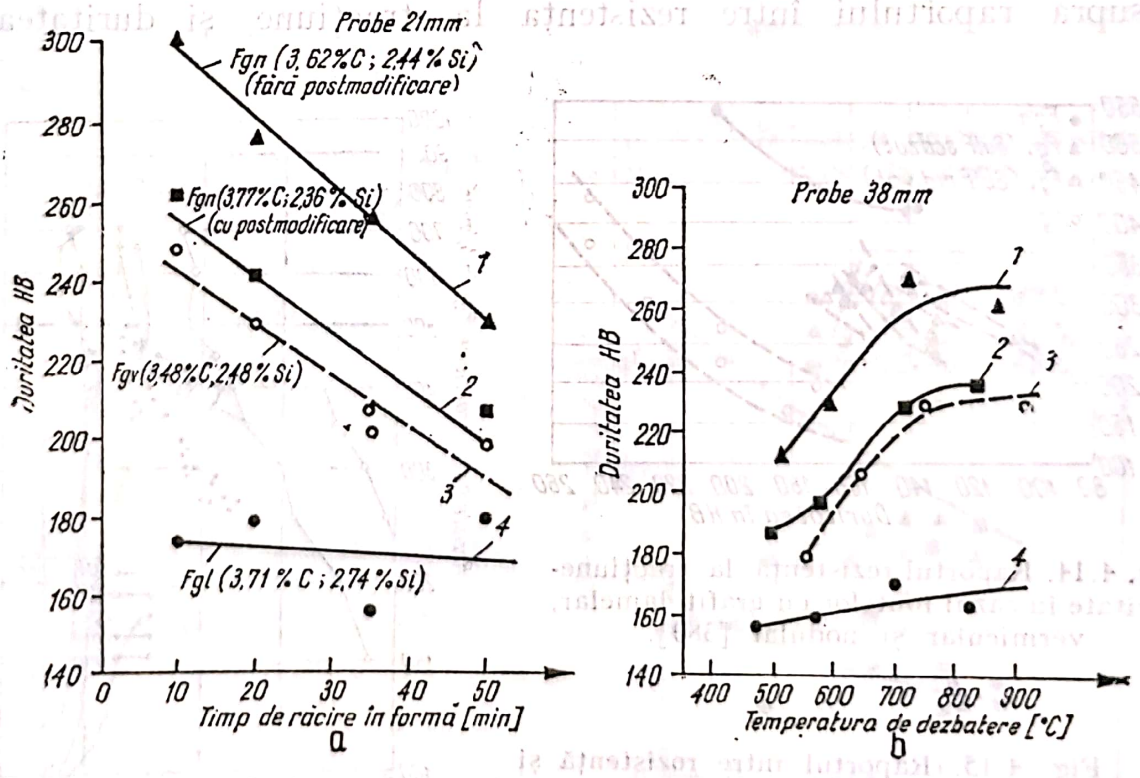


Fig. 4.17. Influența timpului de răcire în formă (*a*) și a temperaturii de dezbatere (*b*) asupra durității fontelor [297].

Scanned with OKEN Scanner

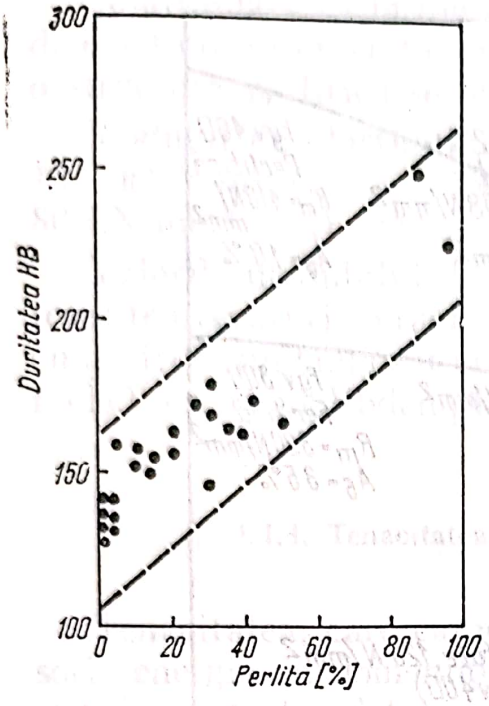


Fig. 4.18. Influența conținutului de perlită asupra durității fontelor cu grafit vermicular [216].

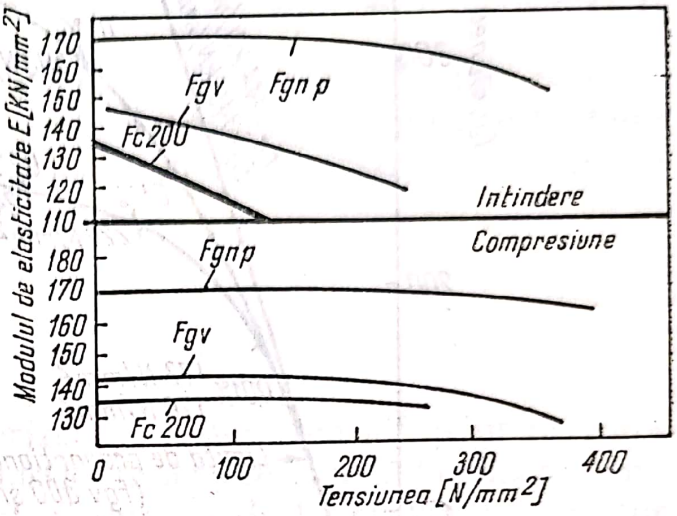


Fig. 4.19. Modulul de elasticitate, la întindere și compresiune, al fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular [241].

Analizînd variația durității fontelor cu grafit lamelar și vermicular în timpul încălzirii și răcirii în intervalul 20...900°C s-a constatat o ușoară scădere la $T>500$°C, respectiv o creștere în domeniul700...500°C. Fontele turnate în forme metalice prezintă o stabilitate mai mare la temperaturi ridicate [166].

4.1.3. Modulul de elasticitate

Spre deosebire de fontele cu grafit lamelar, fontele cu grafit vermicular se comportă ca și materialele tenace, avînd o limită de proporționalitate doar în mică măsură mai scăzută decît cea a fontelor cu grafit nodular.

Fontele cu grafit vermicular prezintă valori intermediare pentru modulul de elasticitate în raport cu fontele cu grafit lamelar și nodular, atît în cazul solicitărilor de întindere cît și de compresiune (fig. 4.19) [241].

Modulul de elasticitate al fontelor cu grafit vermicular prezintă valori mai mari decît cele înregistrate la fontele cu grafit lamelar, dar este cu 5...15% mai scăzut decît la cele cu grafit nodular. Se remarcă faptul că modulul de elasticitate depinde doar în mică măsură de valoarea carbonului echivalent sau grosimea de perete [333].

Masa metalică de bază afectează în mai mare măsură limita de curgere și rezistența la rupere a fontei cu grafit vermicular, decît modulul său de elasticitate, așa cum rezultă din fig. 4.20 [256].

Scanned with OKEN Scanner

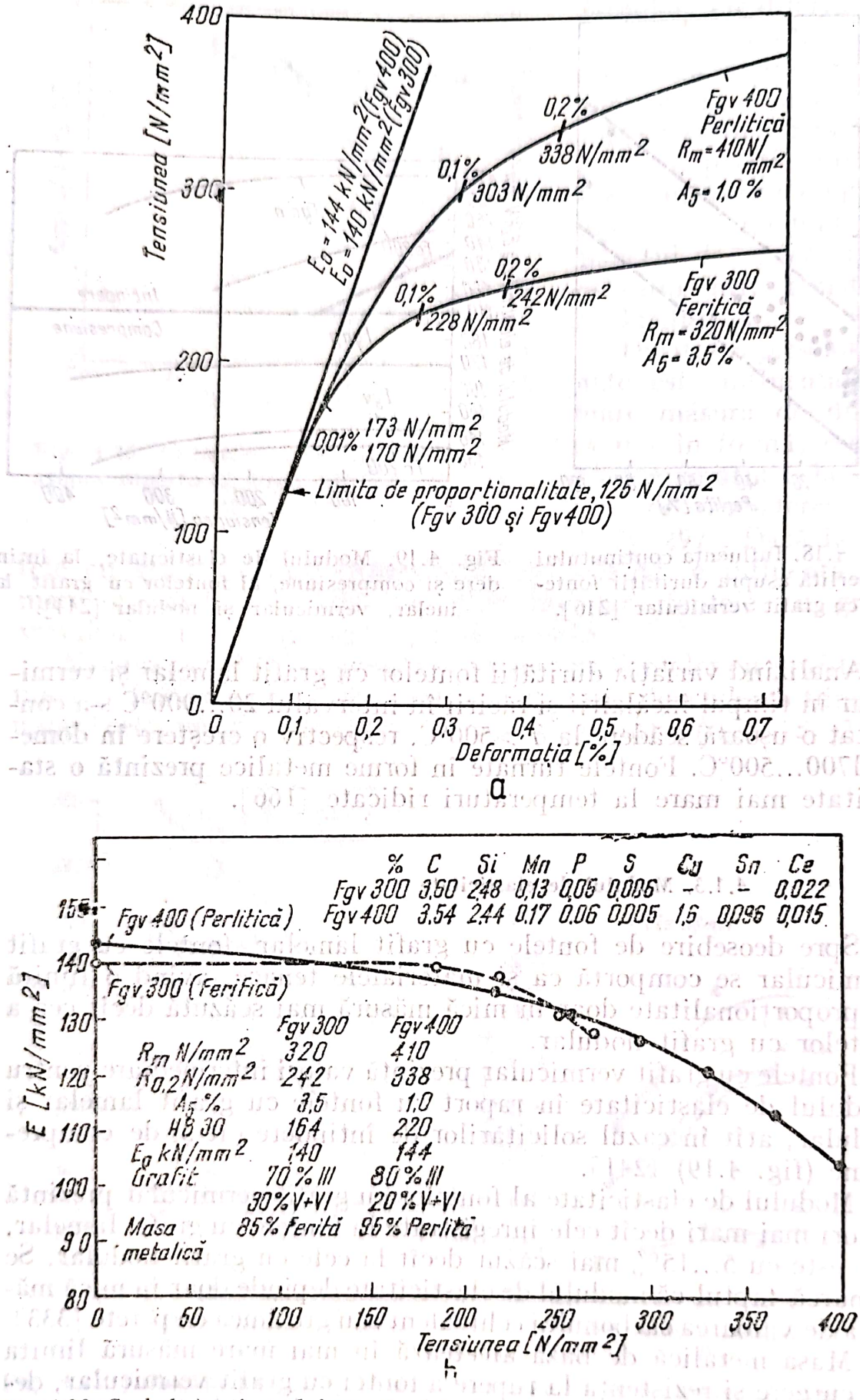


Fig. 4.20. Curbele tensiune-deformație (*a*) și modulul de elasticitate (*b*) al fontelor cu grafit vermicular, feritice și perlitice [256].

Scanned with OKEN Scanner

Se apreciază că la fontele cu grafit vermicular feritice modulul de elasticitate prezintă valori de 137...140 kN/mm², în timp ce la o structură perlitică se obțin valori de 144...145 kN/mm².

Modulul de elasticitate (E) are valorile: 170 kN/mm² (Fgn), 157 kN/mm² (Fgv), 135 kN/mm² (fonte cu grafit coral) și 80 kN/mm² (Fgl) [253].

Valorile modulului de elasticitate se micșorează odată cu creșterea temperaturii, practic în aceeași măsură, atît în cazul fontelor cu grafit vermicular cît și al celor cu grafit lamelar, slab aliate cu nichel, crom, molibden [4].

4.1.4. Tenacitatea

Tenacitatea, care caracterizează capacitatea aliajelor de a absorbi energia în domeniul plastic, fără să se ajungă la rupere, constituie un factor determinant al duratei de funcționare a multor piese. Se propune ferita drept fază de bază care conține ca faze *disperse* următoarele: grafitul, perlita, eutecticul fosforos, incluziunile nemetalice (sulfuri, nitruri, oxizi etc.), defectele de rețea și atomii străini [57].

Caracterizarea, din punct de vedere dimensional, a acestor faze dispersate este prezentată în fig. 4.21 [57].

Perlita influențează tenacitatea atît prin mărimea separărilor (10^{-3}...10^{-2} cm) cît mai ales prin gradul său de dispersie, respectiv distanța interlamelară (10^{-5}...10^{-4} cm), care determină îmbunătățirea acestei caracteristici.

Eutecticul fosforos, dispus sub formă de rețea are un puternic efect de fragilizare, cu atît mai puternic cu cît gradul de saturație în carbon al fontei este mai scăzut.

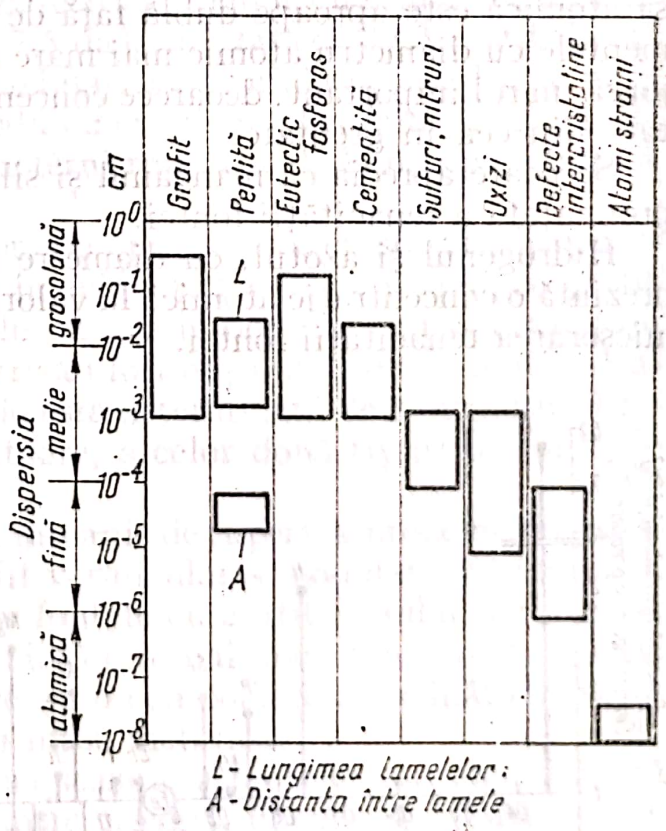


Fig. 4.21. Caracteristicile fazelor disperse în structura fontei [57].

Scanned with OKEN Scanner

Cementita, principala formă de existență a carburilor, influențează negativ tenacitatea fontei, atît în cazul în care este legată (în perlită) cît mai ales în stare liberă.

Incluziunile nemetalice, chiar în cantități mici, reduc în mare măsură tenacitatea fontelor. Cu cît particulele sînt mai mici și la distanțe mai mari între ele, cu atît proprietățile fontei sînt mai bune. Un rol important în apariția de incluziuni îl are sulful, care, la valori de 0,1% duce la apariția a 0,27% sulfuri.

Principalele defecte intercristaline sînt segregațiile interscristaline și dislocațiile. Tendința de segregare intercristalină a unor elemente, cum este fosforul, determină un efect puternic de fragilitate, în cazul fosforului chiar mai puternic decît atunci cînd formează eutectic fosforos.

O mare influență asupra fragilizării fontei o are deformarea rețelei cristaline a feritei, prin pătrunderea unor atomi străini. Aceste deteriorări ale rețelei conduc la apariția unor fenomene ce provoacă creșterea tensiunilor, iar ca urmare scade ductibilitatea materialului. Puterea acestei influențe depinde nu numai de diametrul atomic al elementelor străine, dar și de greutatea lor atomică, un rol important jucîndu-l numărul de atomi (fig. 4.22) [57]

În jurul atomilor de fier se găsesc Ni, Cu, Cr, cu diametre mai mici decît ale fierului sînt Si, Mn, P. Siliciul, care se găsește inevitabil în fontă are o importanță specială, deoarece concentrația sa atomică este aproape dublă față de cea în greutate. Dintre elementele cu diametru atomic mai mare decît a fierului, molibdenul joacă un rol important, deoarece concentrația sa atomică este jumătate din cea în greutate.

Se poate aprecia că manganul și siliciul determină o micșorare pronunțată a tenacității fontei.

Hidrogenul și azotul, cu diametre atomice inferioare fierului, prezintă o concentrație atomică la valori ridicate, ceea ce determină micșorarea tenacității fontei.

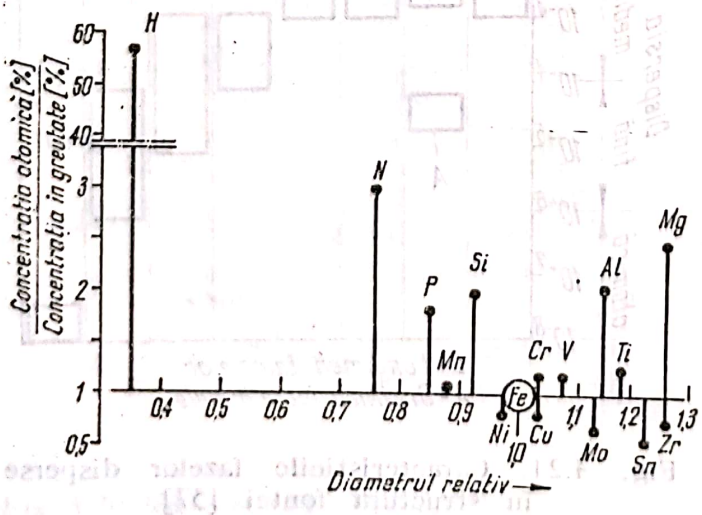


Fig. 4.22. Poziția diferitelor elemente în raport cu fierul [57].

Scanned with OKEN Scanner

Grafitul acționează ca un puternic concentrator de tensiuni cu atît mai intens cu cît gradul de compactitate este mai redus.

Micșorarea fragilității fontelor se realizează deci prin măsuri ce vizează atît masa metalică cît și grafitul. Mărirea tenacității are loc atît prin creșterea gradului de puritate al fontei cît și prin micșorarea efectului de crestare manifestat de către separările de grafit, prin creșterea gradului lor de compactitate.

Tenacitatea fontelor poate fi pusă în evidență prin valoarea modulului de șoc. Modulul de șoc reprezintă lucrul mecanic de rupere la încovoiere prin șoc, raportat la volumul epruvetei (J/cm³), fiind utilizate epruvete ∅ 20×120 mm, cu 100 mm distanță între reazeme [57].

În lucrarea [57] se propune luarea în considerare a factorului Z care exprimă relațiile între rezistența la tracțiune și modulul de șoc, cu următoarea formulare:

$$Z = \frac{\lg a_M + K}{\lg R_m}, \qquad (4.6)$$

în care: a_M este modulul de șoc, în J/cm³; R_m — rezistența la tracțiune, în N/mm²; K — constantă ($K = 0{,}70$).

Creșterea factorului Z indică faptul că fontele sînt caracterizate de o tenacitate înaltă, combinată cu o rezistență mecanică superioară.

La o masă metalică de bază feritică, fontele cu grafit vermicular prezintă o reziliență de 6,7...7,5 daJ/cm², față de 16,3...19 daJ/cm² în cazul fontelor cu grafit nodular, determinările fiind efectuate pe probe fără crestătură. Odată cu creșterea plasticității și tenacității, fontele își schimbă caracterul rupturii, de la o rupere fragilă la o rupere tenace [333].

Studiul rezilienței fontelor, pe epruvete cu crestătură în intervalul +21°C la —40°C a scos în evidență faptul că fontele cu grafit vermicular, obținute din cele cu grafit nodular, au o tenacitate mai mare decît în cazul în care au fost obținute dintr-o fontă cenușie obișnuită. Această situație este determinată de conținutul diferit în elemente antimodificatoare, a celor două tipuri de fonte de bază [380].

O comparație între lucrul mecanic de rupere a probelor (cu crestătură), între fontele cu grafit vermicular și nodular este realizată în fig. 4.23 [216]. În timp ce fontele cu grafit nodular, cu o masă metalică de bază feritică prezintă cea mai mare tenacitate, fontele cu grafit vermicular perlitice au o comportare asemănătoare celor cu grafit nodular, de aceeași masă metalică.

Fragilitatea la temperaturi scăzute a fontelor este determinată de către slăbirea legăturilor între grăunți, în special datorită segregării la granița celulelor eutectice a unor faze, cum ar fi cele ale fosforului (fig.4.24).

Scanned with OKEN Scanner

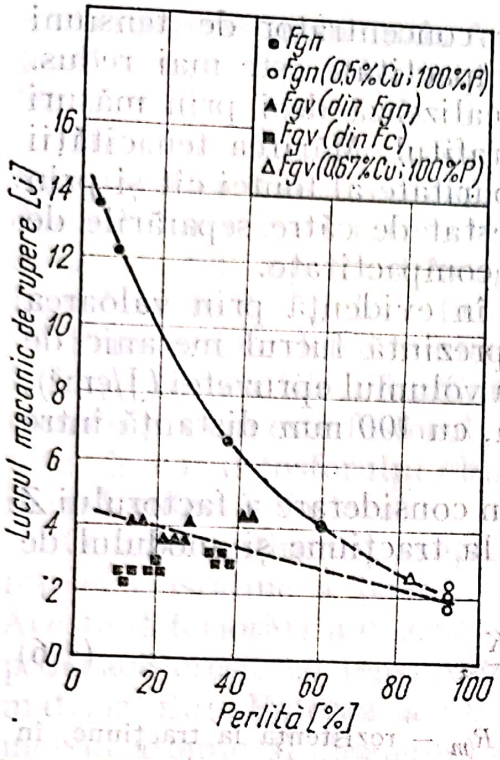


Fig. 4.23. Tenacitatea fontelor cu grafit vermicular și nodular [216].

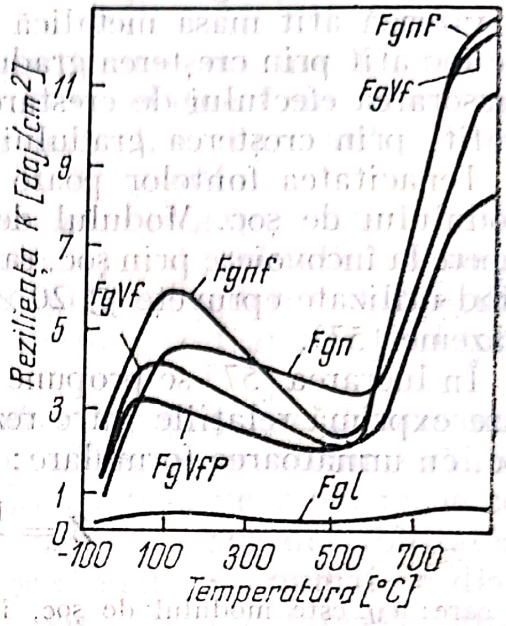


Fig. 4.24. Influența temperaturii asupra valorii rezilienței fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular [115].

Avînd în vedere faptul că îndepărtarea completă a fosforului nu este posibilă, se propune utilizarea unor elemente cu capacitate mare de adsorbție, în raport cu fierul, dar care nu formează faze, aplicîndu-se principiul „concurenței adsorbției" [10].

Activitatea între grăunți a elementelor este determinată prin forța de legare atomică a elementelor cu limita grăunților masei metalice, considerate în sisteme binare fier-element. Rezultatele obținute sînt prezentate în tabelul 4.4 [10], în care se utilizează notațiile: K_1 — raportul între energia (calculată) de legare a atomilor elementelor cu limita grăunților (F_e) și cea a atomilor de fos-

Tabelul 4.4

VALORILE FACTORILOR K_1 ȘI K_2, PENTRU DIFERITE ELEMENTE [10]

Elementul	F_e eV	K_1	σ_e erg/cm²	K_2	Elementul	F_e eV	K_1	σ_e erg/cm²	K_2
Ca	−0,70	1,71	420	4	W	−0,19	0,46	2300	0,80
B	−0,66	1,61	2100	0,88	Cr	−0,18	0,44	1590	1,16
Ce	−0,60	1,46	680	2,71	Ni	−0,18	0,44	1810	1,02
Mg	−0,38	0,93	569	3,23	Mo	−0,14	0,34	2050	0,90
Ba	−0,37	0,90	330	5,58	Zr	−0,14	0,34	1400	1,31
Sn	−0,345	0,84	554	3,32	P	−0,41	1,0	52,3	14,42

Scanned with OKEN Scanner

or (F_p); K_2 — raportul între energia superficială liberă a fierului); (σ_{Fe} = 1840 erg/cm²) și cea a elementelor introduse (σ_e).

Pentru realizarea „adsorbției concurente" a elementelor, față de cea a fosforului, necesară pentru a neutraliza acțiunea negativă a acestui element, este necesar ca factorul $K_1 > 1{,}0$, iar K_2 să prezinte valori foarte mici. Aceste condiții le îndeplinesc elementele B, Ce, Ca, Mg și Ba. Deoarece B și Mg se dizolvă foarte puțin în Fe_α, la limita grăunților nu se atinge concentrația necesară. Din această cauză, ca elemente de adsorbție se utilizează Ca, Ce (și PR), Ba.

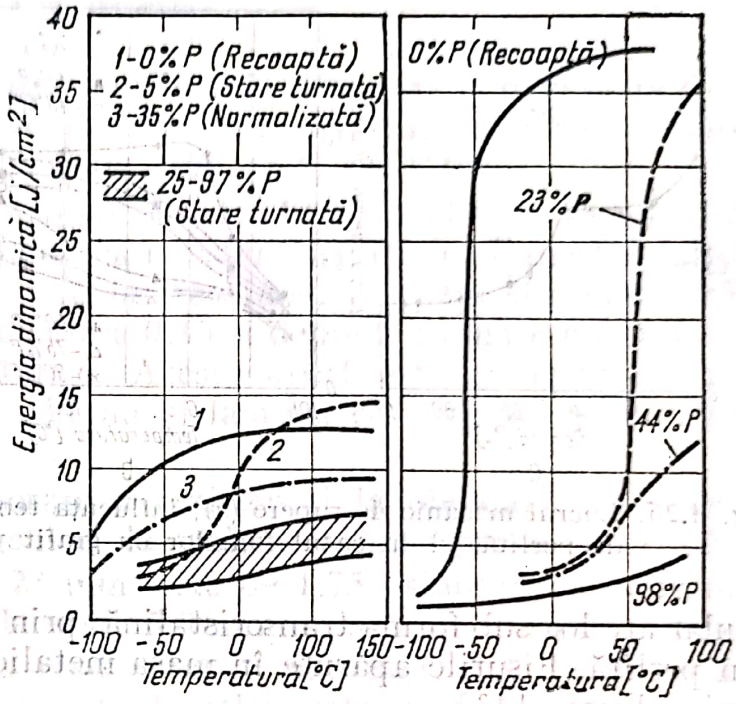


Fig. 4.25. Energia dinamică de formare a fisurilor la fontele cu grafit vermicular și nodular [216].

Adaosuri de 0,5...1,0%SiCa (30%Ca) determină mărirea valorii rezilienței, îmbunătățind rezistența la temperaturi scăzute de 1,5... ...2,0 ori. La temperaturi de —60°C, reziliența este mult îmbunătățită la adaosuri de Ca și Ce (PR).

La fontele cu 0,12...0,16% P eutecticul fosforos se găsește sub formă de separări mari la fontele obișnuite și sub formă de separări compacte și mici, la fontele tratate cu calciu și pământuri rare.

Diferențele între valorile energiei dinamice de formare a fisurilor în cazul fontelor cu grafit vermicular și nodular sînt ilustrate de către fig.4.25 [216]. Se constată că la fontele cu grafit vermicular feritice se obțin valori similare celor înregistrate la fontele cu brafit nodular perlitice.

Analizînd mecanismul de inițiere a fisurilor și de rupere a fontelor cu grafit vermicular perlitice s-a constatat că microfisurile apar atît în separările de grafit cît și la limita grafit-masă metalică. În majoritatea cazurilor ruperea are loc la limita între cristalele de grafit.

Fisurile în masa metalică se produc prin ferită, datorită ruperii transcristaline (grafitul este întotdeauna înconjurat de ferită); totuși, în unele cazuri s-au înregistrat ruperi intracristaline a feritei. Se poate aprecia că ruperea în cazul fontei cu grafit vermi-

Scanned with OKEN Scanner

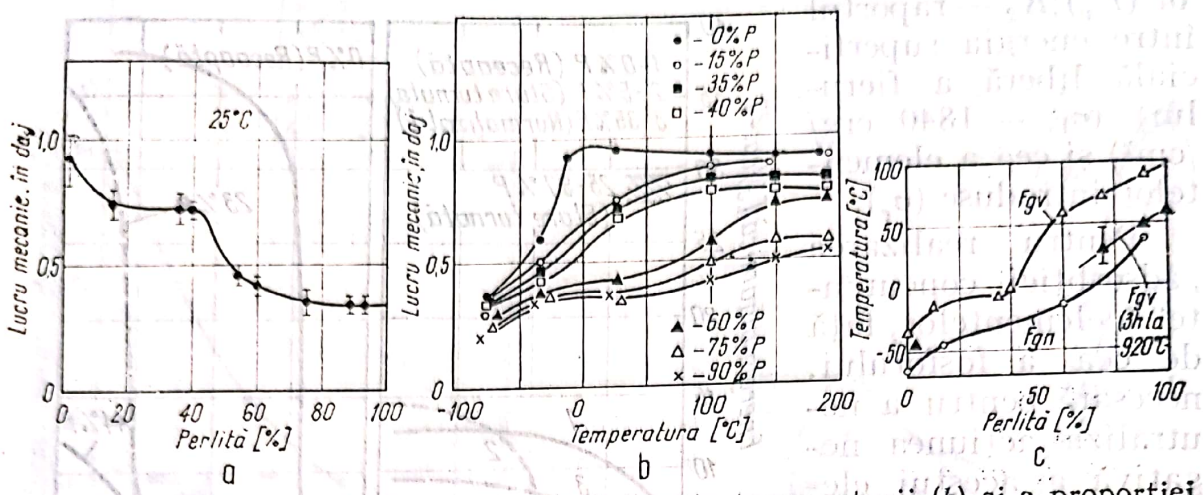


Fig. 4.26. Lucrul mecanic de rupere (*a*), influența temperaturii (*b*) și a proporției de perlită (*c*) în cazul fontelor cu grafit vermicular [154].

cular are loc sub forma transcristalină, prin ferită și intracristalină în perlită. Fisurile apărute în masa metalică se propagă în ferită prin clivaj [143].

Influența proporției de perlită din structura fontelor cu grafit vermicular asupra lucrului mecanic de rupere este prezentată în fig. 4.26 [154]. Determinările, efectuate la 25°C, scot în evidență existența unei zone de tranziție la circa 40%P.

Temperatura de încercare influențează valorile lucrului mecanic, de rupere, la fontele cu grafit vermicular, în special la o structură predominant feritică. Temperatura de tranziție ductil-fragil crește odată cu mărirea proporției de perlită din structura fontelor cu grafit vermicular și nodular, valori mai ridicate fiind obținute în cazul grafitului vermicular.

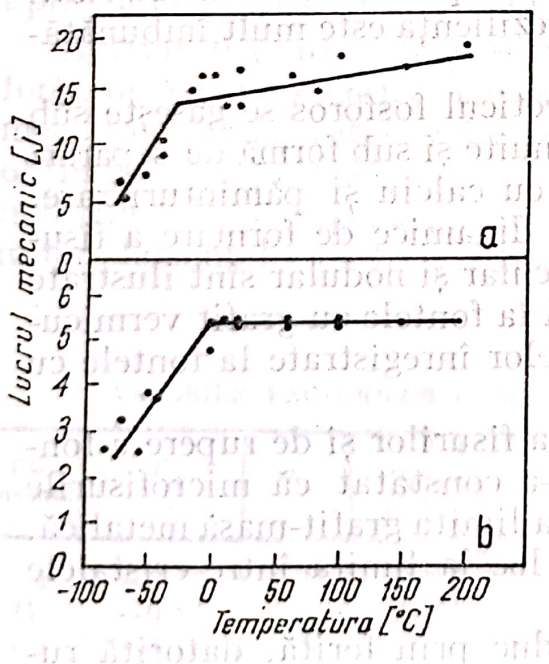


Fig. 4.27. Lucrul mecanic de rupere prin șoc în cazul fontelor cu grafit vermicular feritice [256]:
a — probe fără crestătură; *b* — crestătură în „V".

La cantități de 0; 40; 60 și 90%P se obțin temperaturi de tranziție ductil-fragil ale fontelor cu grafit vermicular la valorile: (—30°C), (+25°C), (+100°C) și respectiv (+200°C).

Analizînd tenacitatea fontelor cu grafit vermicular feritice la diferite temperaturi, în condițiile utilizării unor probe Charpy (10 ×10 mm) fără crestătură și cu crestătură în formă de V, s-au obținut datele prezentate în fig. 4.27 [256].

Scanned with OKEN Scanner

4.1.5. Rezistența la oboseală

Gradul de compactitate a grafitului acționează în mod favorabil asupra rezistenței la oboseală a fontelor, o acțiune deosebită avînd prezența amorselor de fisurare, cum ar fi crestăturile [298].

Ca și la celelalte fonte, rezistența la oboseală a fontelor cu grafit vermicular depinde de valoarea rezistenței inițiale. Raportul între rezistența la oboseală și cea la tracțiune, în cazul probelor fără crestătură are valoarea de circa 0,45 și depinde în mare măsură de constituenții masei metalice. Acest raport este caracteristic și pentru fontele cu grafit nodular și lamelar cu conținut scăzut de fosfor.

Coeficientul de micșorare a rezistenței la oboseală, în cazul fontelor cu grafit vermicular, la utilizarea unor probe cu crestătură (V — cu raza de 0,25 mm) este de 1,75, similar ca la Fgn. La raze ale crestăturii de peste 5,0 mm nu se mai constată influențe ale acesteia asupra rezistenței la oboseală, atît la Fgv cît și Fgn. Față de fontele cu grafit lamelar, cele cu grafit vermicular sînt mai sensibile la influența crestăturilor. Sensibilitatea sporită la efectul crestăturilor este determinată de faptul că separările de grafit vermicular prezintă un efect de crestare mai scăzut în structura fontei [333].

Fontele cu grafit vermicular (max. 30% Gn) au o rezistență la oboseală superioară celei înregistrate la fontele cu grafit lamelar (80...120 N/mm²) și destul de apropiată de cea a fontelor cu grafit nodular, nealiate, în stare turnată [2].

Componența masei metalice de bază influențează valoarea rezistenței la oboseală. Astfel, la o masă metalică feritică (max. 20%P) au fost obținute valori de 170 N/mm², la un coeficient relativ de 0,45, în timp ce la o masă metalică perlitică (97%P) rezistența la oboseală este de 190 N/mm², la un raport 0,37 (fig. 4.28) [216].

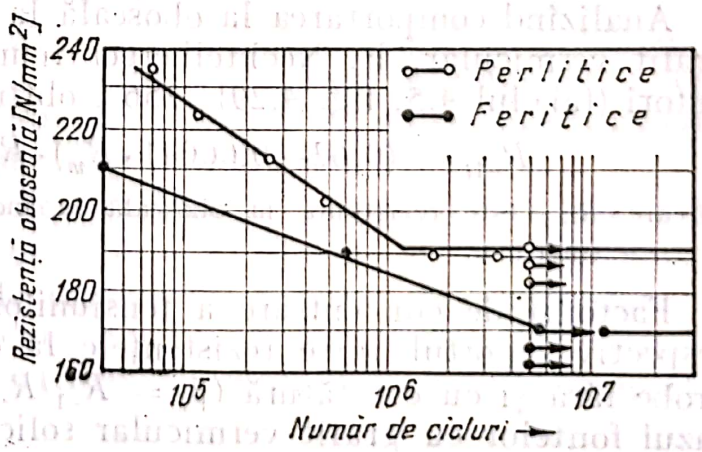


Fig. 4.28. Rezistența la oboseală a fontelor cu grafit vermicular, feritice și perlitice [216].

Analiza la microscop a zonei rupte la oboseală a evidențiat faptul că fisurile se dezvoltă preferențial în inelul de ferită, din jurul separărilor de grafit, deoarece concentrarea de tensiuni este generată tocmai de către grafit [414].

A fost analizat aspectul rupturii, în cazul încercării statice și la oboseală, al fontelor cu grafit lamelar (Fc 200; 90%P), nodular (Fgn 500; 60%P) și vermicular (Fgv 350; 100%F) [339]. În cazul fontelor cenușii, la încercare statică se obține o suprafață de rupere reliefată, în timp ce pentru o rupere la oboseală este caracteristică o suprafață netedă. În cazul fontelor cu grafit nodular, la ruperea statică are loc o deformare a feritei din jurul separărilor de grafit, cu formarea caracterului celular.

Ruperea statică la fontele cu grafit vermicular are un caracter similar (celular), în timp ce pentru ruperea la oboseală este caracteristică o suprafață netedă, cu sectoare cu caracter elicoidal.

Tabelul 4.5

REZISTENȚA LA OBOSEALĂ LA ÎNCOVOIERE A FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR [356]

Rezistență tracțiune R_m, în N/mm²	336	340	350	388	414	473	386
Limita de curgere $R_{0,2}$, în N/mm²	257	280	270	276	297	335	278
Alungirea A, în %	6,7	4,5	>2	2,5	2	2	2
Rezistență la oboseală							
$\pm R_{-1i}$ în N/mm²	211	165	170	178	185	208	186
R_{-1i}/R_m	0,63	0,49	0,49	0,46	0,45	0,44	0,48
Rezistența la oboseală, probe cu crestătură în „V"							
$\pm R_{-1K}$, în N/mm²	—	—	—	100	108	116	—
$\beta_K = R_{-1}/R_{-1K}$	—	—	—	1,78	1,71	1,79	—

Analizînd comportarea la oboseală la încovoiere a fontelor c grafit vermicular, E. Nechtelberger reunește datele mai multor autori (tabelul 4.5, fig. 4.29) [256], obținînd relația

$$R_{-1i} = (0{,}63 - 0{,}00041 \cdot R_m) \cdot R_m \quad [\text{N/mm}^2], \qquad (4.7)$$

în care: R_{-1i} este rezistența la oboseală la încovoiere; R_m — rezistența la tracțiune.

Factorul de concentrare a tensiunilor la solicitări variabile, respectiv raportul între rezistențele la oboseală determinate pe probe fără și cu crestătură ($\beta_k = R_{-1}/R_{-1k}$) este de 1,71...1,79 în azul fontelor cu grafit vermicular solicitate la încovoiere.

Scanned with OKEN Scanner

În condiții similare de solicitare, fontele cu grafit nodular (Fgn 400) au $\beta_k > 1{,}85$, în timp ce la fontele cu grafit lamelar $\beta_k < 1{,}5$ [256]. Rezultă deci că fontele cu grafit vermicular au o sensibilitate mai scăzută la efectul de crestare, în comparație cu fontele cu grafit nodular.

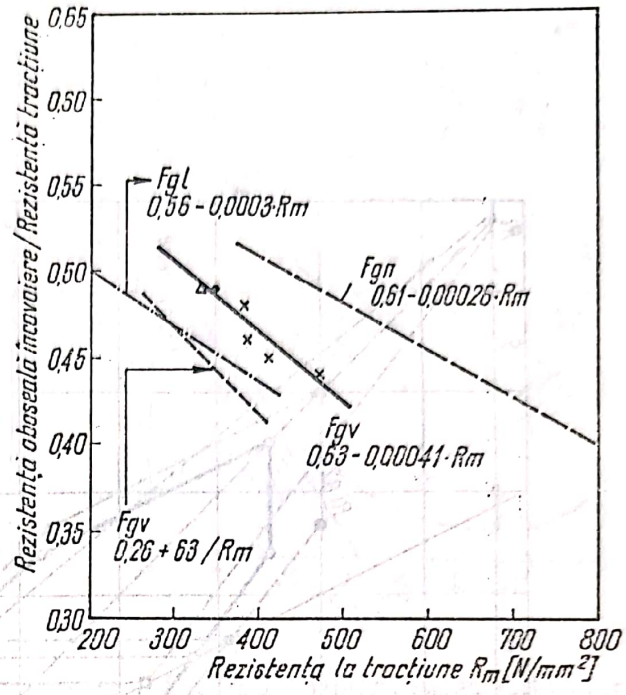


Fig. 4.29. Rezistența la oboseală la încovoiere, în raport cu rezistența la tracțiune, în cazul fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular [256].

Rezultatele încercării la oboseală a fontelor feritice cu grafit lamelar, vermicular și nodular, sînt prezentate în fig. 4.30. Rezultă că fonta feritică cu grafit vermicular are rezistență la oboseală, la solicitări de tracțiune-compresiune de 120 N/mm², deci cu circa 30% mai scăzută decît cea înregistrată la încovoiere (170 N/mm²).

În cazul unor fonte cu grafit lamelar și vermicular utilizate la turnarea pieselor pentru motoare a fost urmărită capacitatea de deformare (fig. 4.31 și fig. 4.32) [4]. Diagramele de deformare au fost înregistrate pe probe ∅ 8 mm, prelucrate din probele turnate ∅60 ×400 mm. Condițiile de încercare au fost următoarele: a) încălzirea pînă la T_{max}; b) compresiunea pînă la deformația maximă $\varepsilon_t = \alpha(T_{max} - T_0)$, respectiv cu coeficientul de rigiditate $K = -1$, cu încercarea ulterioară la relaxarea tensiunilor, într-o perioadă de timp dată; c) descărcarea, răcirea epruvetelor și apoi tracțiunea lor pînă la obținerea sub sarcină a lungimii inițiale.

În diagramele din fig. 4.31, la partea inferioară sînt prezentate familiile de curbe σ_R^{τ}, care caracterizează nivelul de relaxare a tensiunilor de compresiune la diferite durate de relaxare (v. tabelul 4.6), iar la partea superioară curbele σ_y, de variație a limitei de elasticitate la tracțiune după încălzire și răcire.

În calitate de limită de elasticitate la oboseală au fost luate tensiunile $\sigma_{0,02}$ pentru Fgv și $\sigma_{0,01}$ la Fgl, la peste 10^4 cicluri.

Linia σ_{max} corespunde tensiunilor maxime de compresiune și prezintă interes pentru determinarea posibilităților de rupere la primele încălziri ale materialelor cu plasticitate redusă, în special la tensiuni înalte.

Scanned with OKEN Scanner

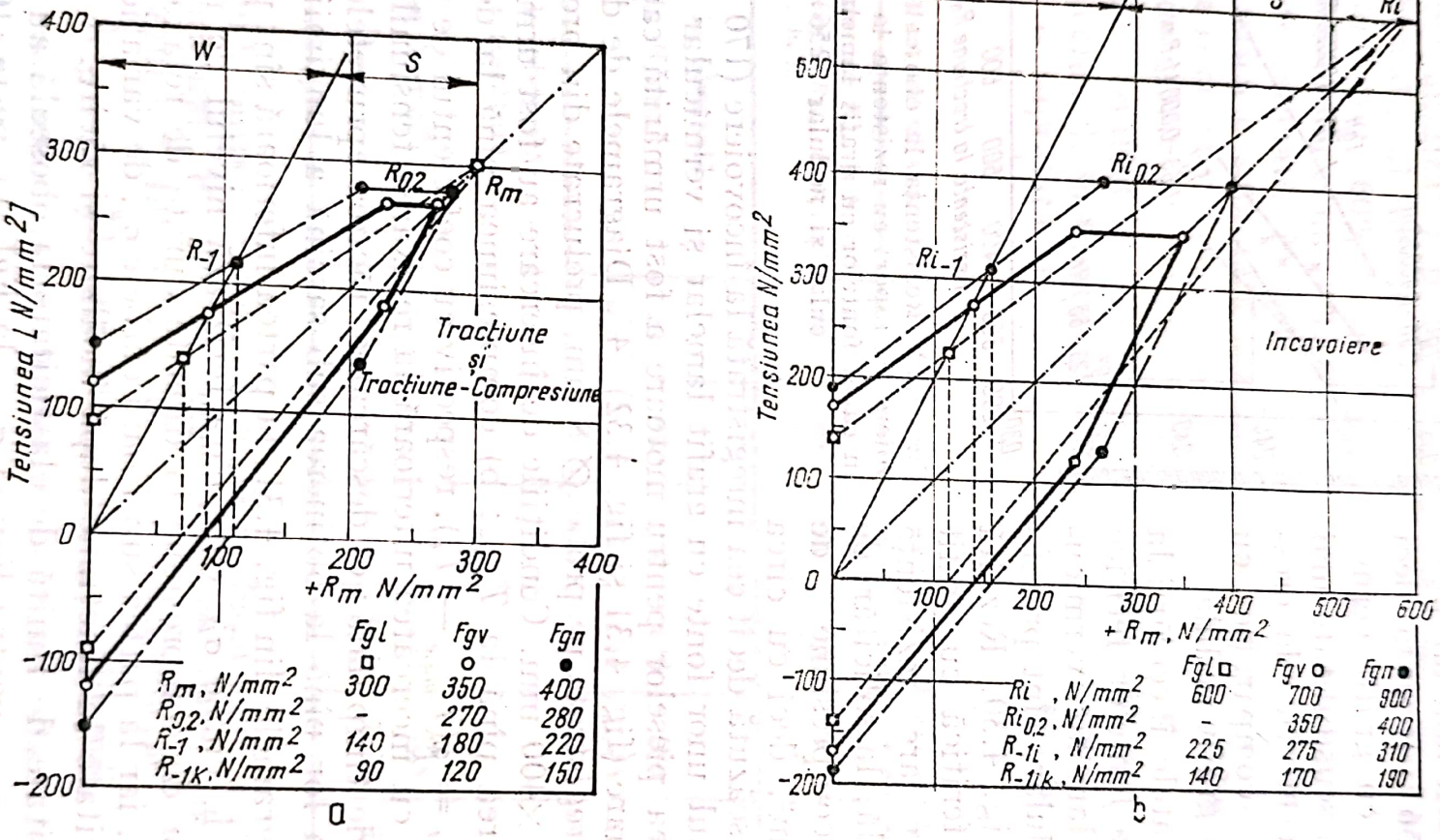


Fig. 4.30. Comportarea la oboseală, la solicitări de tracțiune-compresiune (*a*) și la încovoiere (*b*) a fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular feritice [256].

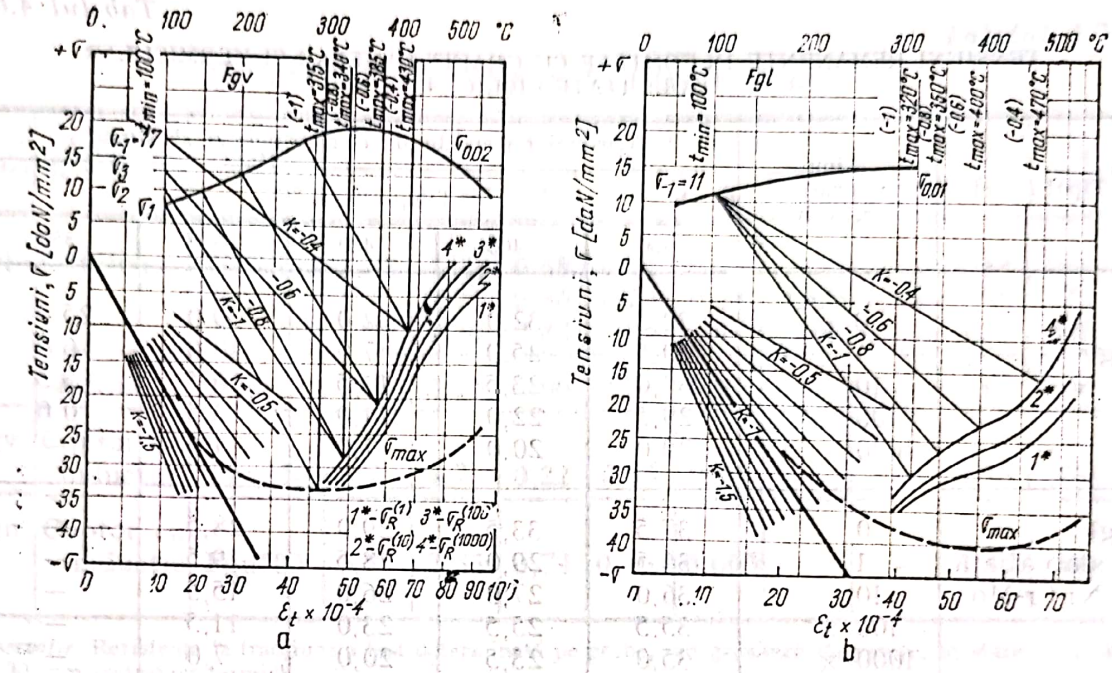


Fig. 4.31. Diagrama de deformare la fontele cu grafit vermicular (*a*) și lamelar (Ni-Cr-Mo) (*b*) [4].

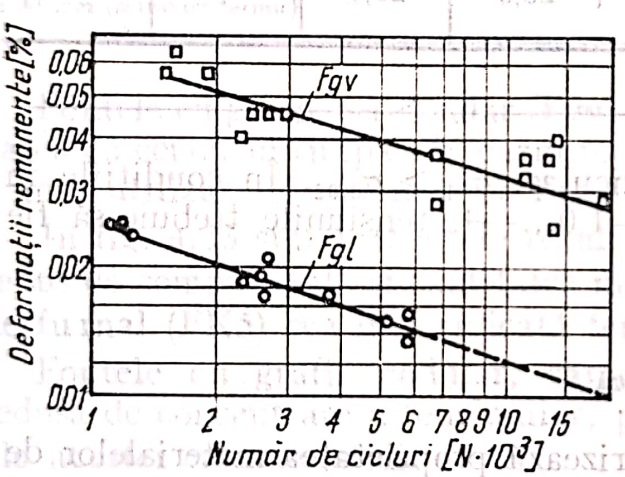


Fig. 4.32. Deformații remanente la fontele cu grafit lamelar și vermicular [4].

Condițiile de deformare cvasielastică sînt caracterizate de: a) temperatura maximă (T_{max}) și minimă (T_{min}) ale ciclului; b) coeficientul de rigiditate (K); c) tensiunile remanente de compresiune după relaxare.

Rezultatele determinării grafice ale T_{max}, la $T_{min} = 100°C$ și schimbarea lui K de la (—1) la (—4) în condițiile în care tensiunile remanente de întindere ating dar nu depășesc limita de oboseală σ_{-1} a materialului arată că aceste temperaturi sînt foarte apropiate în cazul fontelor cu grafit vermicular și lamelar (aliate Ni-Cr-Mo), diferențele fiind doar de 5...15°C.

Se constată că la fontele cu grafit vermicular apare fenomenul Bauschinger, respectiv o scădere importantă a lui $\sigma_{0,02}$ ($T_{min} = 20...200°C$) la întindere după deformare și relaxația la temperaturi maxime pînă la 400°C. Aceasta conduce la necesitatea unei limitări a tensiunilor sau a temperaturii minime a ciclului.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.6

TENSIUNI REMANENTE ÎN FONTELE CU GRAFIT LAMELAR ȘI VERMICULAR SOLICITATE CICLIC [4]

Tipul fontei	Timp relaxație τ, în h	Tensiuni remanente de compresiune σ, daN/mm²				
		Temperatura, °C				
		350	400	450	500	550
Fgv	0	32,5	32,0	32,0	29,0	25,0
	1	30,5	25,0	17,0	10,0	6,0
	10	30,0	23,5	13,5	6,5	3,5
	100 ×	29,5	22,0	11,0	3,5	0,0
	1000 ×	29,0	20,0	7,0	1,0	—
Fgl slab aliată Ni-Cr-Mo	0	37,5	33,5	29,0	28,5	—
	1	36,5	29,0	28,5	19,5	—
	10	36,0	27,0	26,0	15,5	—
	100 ×	35,5	25,5	23,0	11,5	—
	1000 ×	35,0	23,5	20,0	7,0	—

× — Extrapolare

La fontele cu grafit vermicular, $\sigma_{-1} > \sigma_{0,02}$. În condițiile în care $T_{max} < 400°C$ și $K = -1,0...-4$, tensiunile trebuie să fie $\sigma_1 - \sigma_3$.

4.1.6. Tenacitatea ciclică

Tenacitatea ciclică caracterizează proprietatea materialelor de a înmagazina în mod ireversibil energie de deformare în cursul unui ciclu de solicitare.

Probele (∅10 ×300 mm) au fost supuse unor solicitări statice, trasîndu-se curbele de histerezis mecanic (încărcare-descărcare), pe o mașină de încercări statice universală, cu forța de tracțiune maximă de 2000 daN, prevăzută cu un extensometru Mohr-Federhaft [324].

Tenacitatea ciclică este exprimată prin raportul dintre aria curbei histerezis (ΔW) și aria de sub curba de încărcare (W), trasate în coordonatele forță-deformație. Înainte de solicitare, probele au fost supuse unui tratament termic de recoacere grafitizantă, astfel încît masa metalică de bază a constat din 100% ferită.

Caracteristicile fontelor supuse încercărilor sînt prezentate în tabelul 4.7. Fontele cu grafit lamelar, Fgl, elaborate în cubilou, sînt destinate turnării mașinilor unelte (tip FcX). Pentru comparare, au fost utilizate fonte cu grafit lamelar, de primă fuziune (de furnal, tip FK5).

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.7

CARACTERISTICILE FONTELOR SOLICITATE CICLIC [324]

Tipul fontei	Agregatul de elaborare	Marca fontei	Compoziția chimică, %							CE %	R_m N/mm²
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr		
Fgl	Cubilou	FcX200	3,88	1,03	0,68	0,16	0,07	—	—	4,24	210
		FcX250	3,17	2,71	0,86	0,22	0,08	0,15	0,13	4,05	251
		FcX300	3,09	1,26	0,88	0,25	0,07	0,34	0,15	3,54	340
	Furnal	FK5	3,98	2,95	0,96	0,18	0,05	—	—	4,92	60
Fgv	Cuptor cu inducție	Fgv350	3,7	1,7	0,22	0,08	0,01	—	—	4,23	370
Fgn	Cuptor cu inducție	Fgn500	3,7	2,33	0,74	0,165	0,005	—	—	4,45	560

Observație. Rezistența la tracțiune a fost determinată pe probe, cu grosimea de perete, în stare turnată de 30 mm (netratate termic)

Fontele cu grafit vermicular (Fgv) au fost obținute prin modificarea cu ceriu, în timp ce în cazul fontelor cu grafit nodular (Fgn) a fost utilizat un modificator FeSiCaMg.

În fig. 4.33 sînt prezentate rezultatele obținute [324]. Gradul redus de compactitate și cantitatea mare de grafit conferă fontelor de furnal (FK5) cea mai ridicată tenacitate ciclică.

Fontele cu grafit nodular, caracterizate printr-o capacitate redusă de concentrare a tensiunilor, prezintă cele mai mici valori ale acestei caracteristici.

Separările de grafit vermicular, cu un raport între lungime și grosime $L/g = 5...10$, conferă o tenacitate ciclică superioară fontelor cu grafit nodular.

Comportarea fontelor cu grafit vermicular este inferioară fontelor cu grafit lamelar, de furnal, dar destul de apropiată de cea a fontelor de cubilou (tip FcX). Această apropiere este favorizată de viteza mare de răcire a probelor (grosime redusă de perete) și valoarea mai mică a carbonului

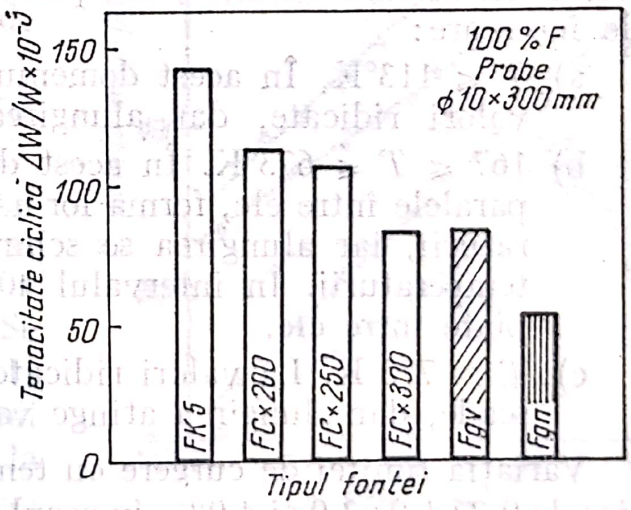


Fig. 4.33. Tenacitatea ciclică a fontelor prezentate în tabelul 4.7: ΔW — aria curbei histeresis; W — suprafața de sub curba de încărcare [324].

Scanned with OKEN Scanner

echivalent, ceea ce asigură fontelor tip FcX o cantitate mai mică de grafit și de dimensiuni scăzute.

Fontele cu grafit vermicular, la care este posibilă realizarea unor cantități mari de grafit, fără ca caracteristicile mecanice să fie afectate ($R > 350$ N/mm^2), pot constitui un bun material pentru turnarea pieselor de mașini unelte, cărora li se impun valori ridicate pentru tenacitatea ciclică.

Analizînd capacitatea de amortizare a vibrațiilor a fontelor, pe probe $\varnothing 20 \times 180$ mm, s-a constatat că valoarea decrementului logaritmic al vibrațiilor este de $4{,}0 \ldots 7{,}0 \cdot 10^{-4}$ în cazul fontelor cu grafit vermicular, în timp ce la fontele cu grafit nodular este de $2{,}5 \cdot 10^{-4}$, iar la cele cu grafit lamelar la nivelul $13{,}2 \times 10^{-4}$ [333].

4.1.7. Proprietățile la temperaturi ridicate

Studii sistematice în domeniul comportării la cald a fontelor cu grafit vermicular au fost realizate de către lucrările [129, 130].

Au fost utilizate fonte cu grafit vermicular cu 3,46%C, 2,55%Si, 0,04%Mn, 0,02%P, 0,01%S, modificate cu 0,15% Ce MM și postmodificate cu FeSi75 (0,5%Si), la 1450°C. Din probele turnate (Y_2) au fost obținute epruvete $\varnothing 3{,}8 \times 60$ mm, care au fost solicitate pe o mașină electromecanică de întindere, cu o viteză de deformare de $3{,}3 \cdot 10^{-4}$ s^{-1}.

Din trasarea curbelor tensiune-deformare (fig. 4.34), rezultă trei domenii caracteristice, din punctul de vedere al temperaturii de încercare:

a) $T \leqslant 113$°K. În acest domeniu, limita de curgere prezintă valori ridicate, dar alungirea este scăzută.

b) $167 \leqslant T \leqslant 673$°K. În acest domeniu, curbele sînt practic paralele între ele, forma lor nedepinzînd de valoarea temperaturii, iar alungirea se schimbă puțin odată cu mărirea temperaturii. În intervalul 400...600°K curbele sînt apropiate între ele.

c) $T > 773$°K. La valori ridicate ale temperaturii, rezistența scade, dar alungirea atinge valori mari.

Variația limitei de curgere cu temperatura, la deformări plastice de 0,2; 1,0; 2,0 și 4,0%, în cazul fontelor cu grafit vermicular, este prezentată în fig. 4.34, *b* [129]. Se constată că în intervalele de temperaturi 77...400°K și 623...873°K valorile limitelor de curgere se micșorează, odată cu mărirea temperaturii, în timp ce

Scanned with OKEN Scanner

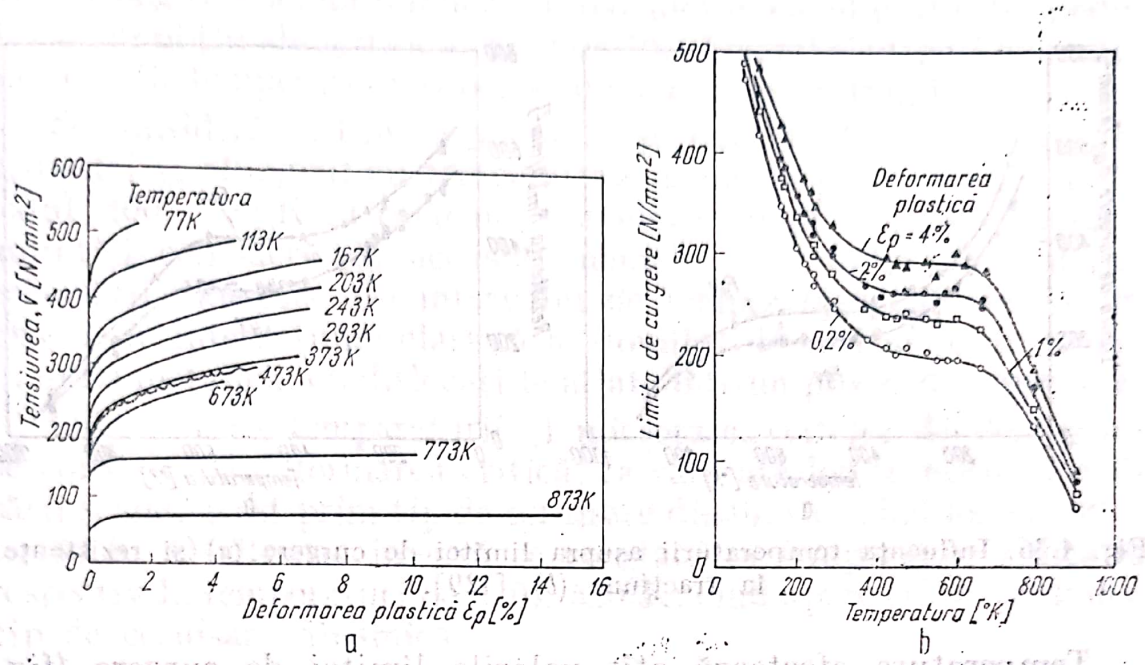


Fig. 4.34. Curbele tensiune-deformație funcție de temperatură (*a*) și limita de curgere (*b*) la fontele cu grafit vermicular [129].

la 400...623°K apar paliere, în care tensiunea nu mai depinde practic de temperatură.

În intervalul 77...373°K, dependența între valoarea tensiunii efective de curgere σ și valoarea deformării plastice ε_p este liniară și are forma

$$\sigma = \sigma_0 + A\sqrt{\varepsilon_p}. \quad (4.8)$$

Factorul A, care corespunde unghiului de înclinare a dreptelor, nu depinde practic de valoarea temperaturii.

Dependența între valorile limitei de curgere și cele ale deformării plastice în cazul fontelor cu grafit vermicular și nodular, feritice, este prezentată în fig. 4.35 [129]. Se constată faptul că, atît la 167°K cît și la 373°K, unghiul de înclinare al dreptelor, la Fgv, prezintă valori mai mici decît la Fgn, deci are loc o creștere mai lentă a rezistenței.

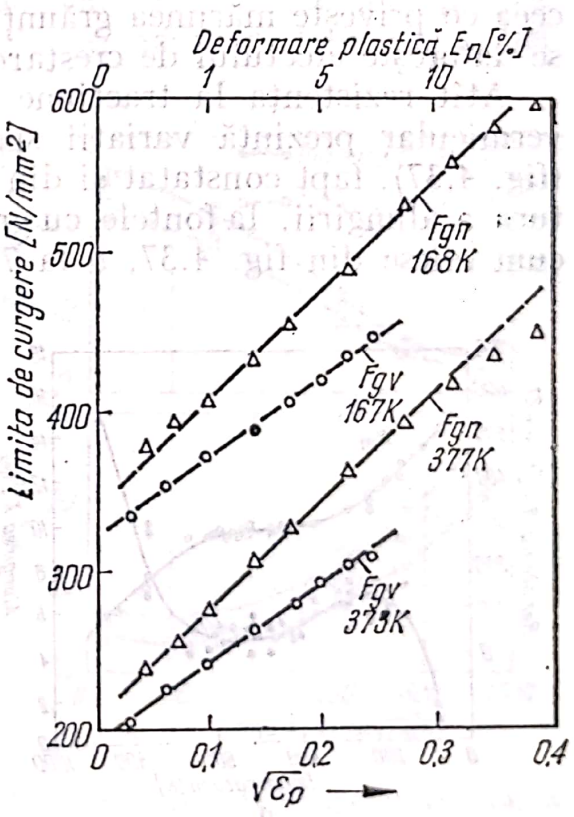


Fig. 4.35. Dependența tensiune-deformație la fontele feritice cu grafit vermicular și nodular [129].

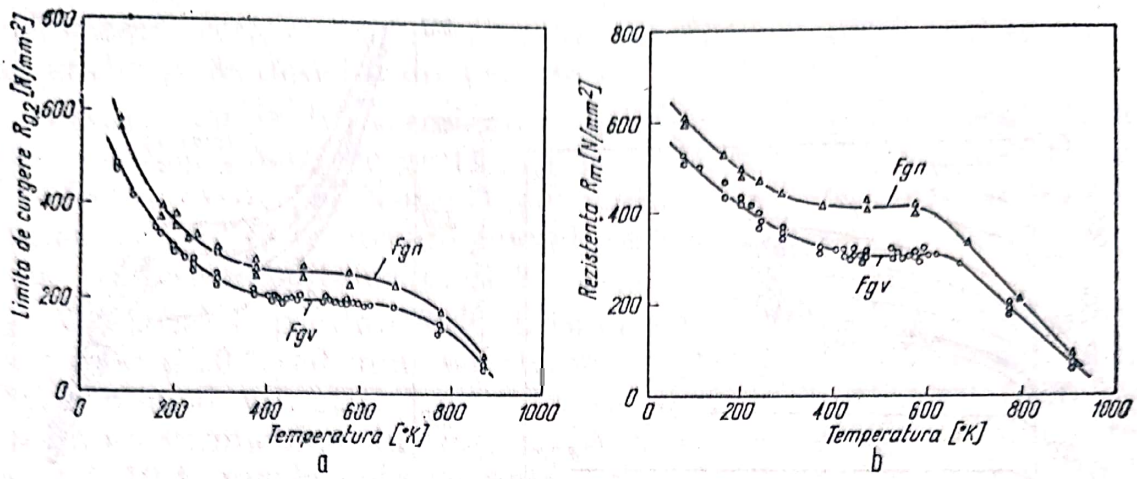


Fig. 4.36. Influența temperaturii asupra limitei de curgere (*a*) și rezistenței la tracțiune (*b*) [129].

Temperatura afectează atît valorile limitei de curgere (fig. 4.36, *a*) cît și cele ale rezistenței (fig. 4.36, *b*), la ambele tipuri de fonte.

În intervalul 200...700°K, limita de curgere ($R_{0,2}$) a fontei cu grafit vermicular este inferioară cele înregistrate la fonta cu grafit nodular cu circa 50 N/mm². Se apreciază că din această diferență, circa 37 N/mm² provin din diferențele înregistrate în ceea ce privește mărimea grăunților de ferită și numai 13 N/mm² se datorește efectului de crestare al grafitului vermicular.

Atît rezistența la tracțiune cît și alungirea fontei cu grafit vermicular prezintă variații specifice în intervalul 400...600°K (fig. 4.37), fapt constatat și din comparația variației cu temperatura a alungirii, la fontele cu grafit vermicular și nodular. După cum reiese din fig. 4.37, *b* la 77°K fontele cu grafit vermicular

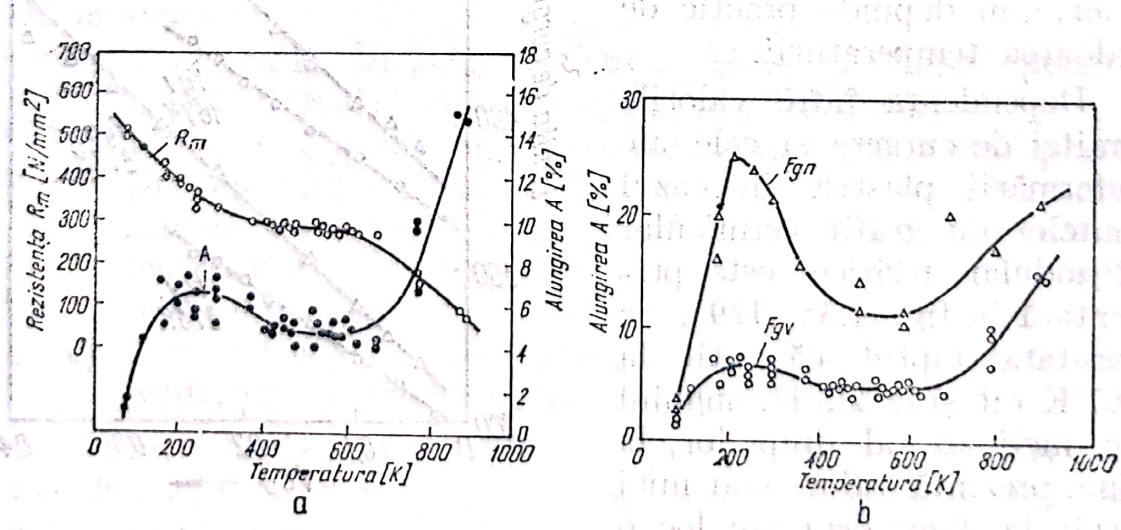


Fig. 4.37. Influența temperaturii asupra rezistenței și alungirii fontelor cu grafit vermicular (*a*) și a alungirii fontelor cu grafit nodular și vermicular (*b*) [129].

au o alungire scăzută (circa 1%), dar nici în cazul grafitului nodular nu se obțin alungiri mai mari de 3%. La ambele tipuri de fonte, la această temperatură ruperea are un caracter fragil.

Se consideră ca fiind o anomalie pe curbele de variație ale rezistenței și alungirii cu temperatura, apariția palierului în intervalul 400...700°K. Urmărind sistematic acest fenomen, autorii amintiți consideră că această anomalie este datorată apariției ecruisării dinamice. În intervalul de temperatură dat are loc un proces de interacțiune elastică a atomilor de carbon ce difuzează în masa metalică, cu dislocațiile aflate într-un proces de alunecare.

La creșterea temperaturii și micșorarea vitezei de deformare se constată că deformarea critică, la care are loc începerea ecruisării scade, acest prim tip de ecruisare dinamică avînd loc la 400... ...480°K. O situație inversă se constată la temperaturi ridicate, respectiv la temperaturi de 520...620°K, cînd apare cel de al doilea tip de ecruisare dinamică.

Un factor important, care caracterizează apariția dislocațiilor ce se deplasează în masa metalică feritică are valoarea 1,44 la Fgv și respectiv 0,77 la Fgn. Datorită faptului că grafitul vermicular are o capacitate mai mare de concentrare a tensiunilor, la ecruisarea dinamică se constată o dependență mai mare între densitatea. dislocațiilor și valoarea alungirii, decît la fontele cu grafit nodular Datorită faptului că energia de activare prezintă valori practic egale la fontele cu grafit vermicular și nodular, ferosiliciu, fier Armco și oțel, se apreciază că începerea ecruisării dinamice depinde nu de forma grafitului, cauza sa fiind, așa cum s-a mai arătat, interacțiunea elastică a dislocațiilor în mișcare cu atomii de carbon [130].

În cazul realizării fontelor cu grafit vermicular prin modificarea cu FeSiMgCeTi, a fost obținută variația rezistenței și alungirii, cu temperatura, prezentată în fig. 4.38 [380].

Fontele la care grafitul are un grad de compactitate mai mare (Fonta 91, $K_f = 7$) prezintă valori mai ridicate pentru rezistență pe întreg intervalul de temperaturi studiat.

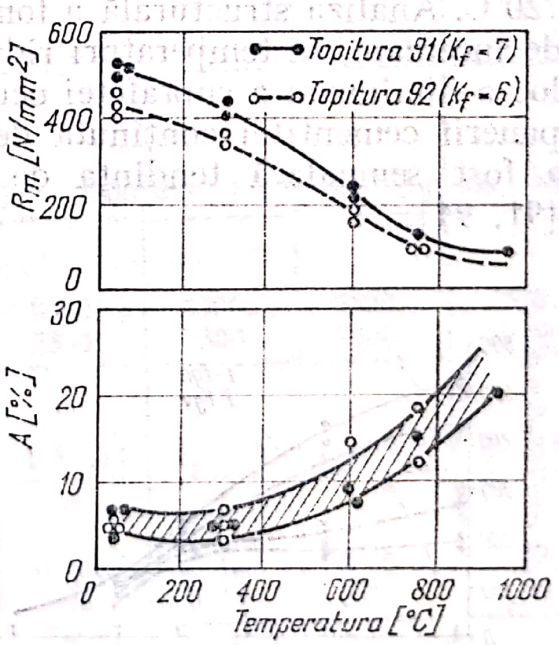


Fig. 4.38. Influența temperaturii asupra rezistenței și alungirii fontelor cu grafit vermicular, cu grade diferite de compactitate [380].

Scanned with OKEN Scanner

Urmărind influența temperaturii, pînă la 500°C, asupra proprietăților fontelor cu grafit vermicular feritice, se constată că rezistența la tracțiune prezintă o ușoară scădere (15...20%) la 150°C și un maximum la 350°C. Peste 400°C se constată o scădere accentuată. Fontele cu grafit lamelar, de aceeași rezistență (Fc300), prezintă un maximum la 300°C [256].

În intervalul 300...600°C, fontele cu grafit vermicular au o rezistență la tracțiune superioară fontelor cu grafit lamelar, slab aliate cu nichel, crom, molibden, utilizate în mod frecvent la turnarea pieselor pentru motoarele termice [4].

Influența temperaturii asupra rezistenței la tracțiune și oboseală precum și asupra alungirii fontelor cu grafit vermicular (v. tabelul 4.8) este prezentată în fig. 4.39 [91].

Tabelul 4.8

CARACTERISTICILE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR [91]

Fonta	Compoziția chimică, %								Factor de formă F_f	Factor Lillybeck K_a
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ti	Al		
1	3,02	2,6	0,46	0,028	0,011	0,025	0,011	0,025	0,44	0,14
2	3,11	2,8	0,37	0,06	0,018	0,019	0,01	0,014	0,39	0,16

Rezistența la tracțiune la 720°C coincide cu rezistența la oboseală a acelorași fonte. Raportul R_{-1}/R_m atinge valoarea 1,14 la 720°C. Analiza structurală a fontelor, în condiții similare cu cele de încercare, la temperaturi ridicate (20...720°C), a arătat că are loc o diminuare a suprafeței ocupate de perlită, datorită descompunerii cementitei conținută de către aceasta. În același timp, a fost semnalată tendința de globulizare a cementitei legate [91, 94].

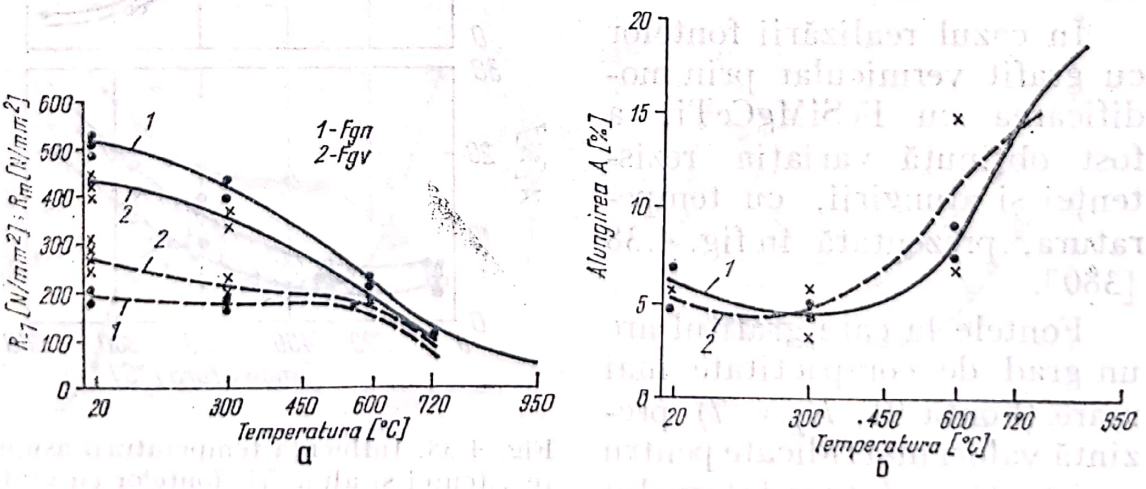


Fig. 4.39. Influența temperaturii asupra rezistenței (*a*) și alungirii (*b*) fontelor cu grafit vermicular [91].

4.2. Proprietăți fizice

4.2.1. Densitatea

Densitatea fontei este determinată în principal de către particularitățile sale structurale, respectiv cantitatea de grafit, constituenții masei metalice, precum și de către defectele de turnare (pori, microretasuri, incluziuni etc.).

Densitățile diferitelor tipuri de fonte sînt prezentate în tabelul 4.9.

Tabelul 4.9

CARACTERISTICI FIZICE ALE ALIAJELOR FEROASE

Proprietatea	Tipul aliajului					
	Fgl	Fgv	Fgn	Fm	Fa	OT
Densitatea ρ, în g/cm³	6,8...7,5	7,0...7,3	7,1...7,35	7,2...7,5	7,35...7,7	7,2...7,82
Coeficient de dilatare liniară α_{20}^{100}, în $\times 10^{-6}$/°C	10...13	12...14	9,0...12,5	10,3...11,0	9...10	11...11,9
Conductibilitatea termică λ_{20}^{100} în W/m·°K	50...70	35...55	25...40	50,2...63	25...40	20...30
Rezistivitatea electrică ρ, în $\mu\Omega$cm	50...110	70...80	40...75	30...45	45...70	12...20
Permeabilitatea magnetică μ_{max}, în Gs/Oe	250...1000	300...1500	300...2000	300...2300	180...230	800...2400
Inducția remanentă B_r, în Gs	4000...7000	4000...7000	3500...7500	5500...7500	6500...7500	6500...10500
Cîmpul coercitiv H_c, în Oe	5...13	4...10	1,5...11	1,6...10	5...11	1,5...5,0
Căldura masică c_{20}^{100}, în kj/kg °K	0,46...0,54	0,48...0,55	0,46...0,56	0,46...0,54	0,50...0,58	0,47...0,48
Permeabilitatea magnetică diferențială, dB/dH	10...14	7...10	5...7	—	—	—

Scanned with OKEN Scanner

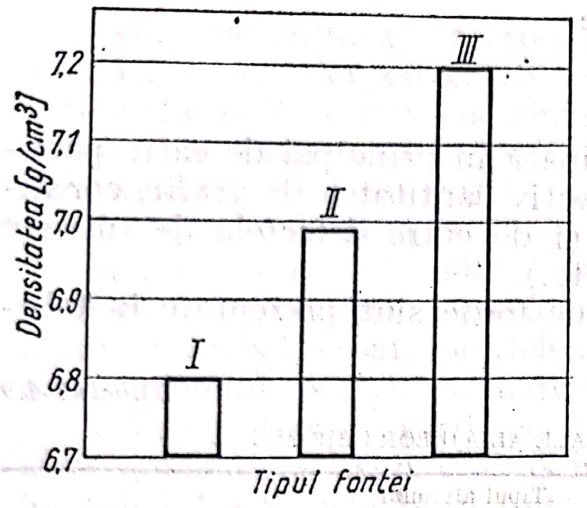


Fig. 4.40. Densitatea fontelor de primă fuziune cu grafit lamelar (*I*) și vermicular (*II*; $S_c = 1,11$) și a celor de cubilou, cu grafit lamelar (*III*; $S_c = 1,01$) [303].

Fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate de valori ale densității similare celor din primul interval de la Fgn, dar ocupă o poziție centrală în intervalul de valori al fontelor cu grafit lamelar (corespunzătoare fontei Fc 200).

Pentru toate fontele, creșterea carbonului echivalent determină micșorarea densității. La aceeași compoziție chimică, fontele elaborate în cubiloul cu aer rece prezintă valori minime, în timp ce valorile maxime ale densității sînt obținute la utilizarea cuptoarelor cu inducție.

Fontele de primă fuziune, cu conținut ridicat de grafit, gaze, incluziuni etc. sînt caracterizate prin densități la valori scăzute, în comparație cu cele de cubilou.

Modificarea fontei de primă fuziune în vederea obținerii grafitului vermicular determină o creștere a compactității fontei și realizarea unei densități superioare celei nemodificate. Valorile obținute se situează la limita inferioară a celor înregistrate în cazul fontelor cu grafit vermicular, de a doua fuziune (fig. 4.40) [303].

4.2.2. Conductibilitatea termică

Conductibilitatea termică a constituenților structurali ai fontei este prezentată în tabelul 4.10 [247].

Grafitul asigură cea mai ridicată conductibilitate termică, în special atunci cînd căldura este transmisă în lungul planului de bază (001), deci în lungul lamelelor de grafit. Datorită faptului că, în cadrul nodulelor de grafit, planele bazale se găsesc perpendicular pe raze, transmiterea căldurii este îngreunată, astfel că la acest tip de grafit conductibilitatea termică este de 4...5 ori mai scăzută decît în cazul grafitului lamelar.

Grafitul vermicular, la care se păstrează o viteză maximă de creștere în direcția perpendiculară pe axa *C*, deci paralel cu planul (001) este caracterizat de o capacitate de transmitere a căldurii superioară celei înregistrate la grafitul nodular.

Din punctul de vedere al masei metalice, cementita are cea mai scăzută, iar ferita cea mai ridicată conductibilitate termică.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.10

CONDUCTIBILITATEA TERMICĂ A CONSTITUENȚILOR DIN STRUCTURA FONTEI [247]

Constituent metalografic	Conductibilitatea termică la diferite temperaturi, °C					
	Cal/cm.s.°C	W/m.K	Cal./cm.s.°C	W/m.K	Cal/cm.s.°C	W/m.K
Grafit	0...100°C		500°C		1000°C	
— paralel cu baza	0,7...1,0	293...419	0,2...0,3	84...126	0,10...0,15	42...63
— perpendicular pe bază	0,2	84	—	—	—	—
Ferita	0,17...0,19	71...80	0,1	42	0,07	29
Perlita	0,12	50	0,105	44	—	—
Cementita	0,017...0,020	7,1...8,4	—	—	—	—

Rezultă deci că fontele feritice sînt caracterizate de cea mai ridicată conductibilitate termică, la toate formele de grafit.

Ca și la fonta cu grafit lamelar, mărirea valorii carbonului echivalent determină creșterea conductibilității termice (tabelul 4.11) [333]. La creșterea temperaturii pînă la 200°C conductibilitatea termică a Fgv atinge un maximum, după care scade, situație semnalată și în cazul fontelor cu grafit nodular. Spre deosebire de aceste cazuri, la fonta cu grafit lamelar conductibilitatea termică scade continuu odată cu ridicarea temperaturii. Fontele cu diferite forme de grafit prezintă valori mai mari pentru conductibilitatea termică la o masă metalică de bază feritică, față de cea perlitică.

Tabelul 4.11

CONDUCTIBILITATEA TERMICĂ A FONTELOR LA O MASĂ METALICĂ PERLITICĂ [333]

Forma grafitului	Carbon echivalent *CE* %	Conductibilitatea termică, W/m.K				
		100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
Lamelar	3,8 4,0	50,24 53,59	49,80 50,66	48,22 47,51	41,87 43,12	38,52 38,93
Nodular	4,2	32,34	34,75	33,08	31,40	29,31
Vermicular	3,9 4,1 4,2	38,1 43,54 41,00	41,0 43,12 43,5	39,4 40,19 41,0	37,3 37,68 38,5	35,2 35,17 36,0

Scanned with OKEN Scanner

Odată cu creșterea temperaturii, diferențele între valorile conductibilității termice a fontelor cu grafit lamelar și vermicular scad, de la 10...12 W/m K (100°C) la 3...4 W/m. K (500°C), în timp ce între fontele cu grafit vermicular și nodular aceste diferențe sînt de 9...10 W/m. °K și respectiv 6...7 W/m.°K. Această situație este determinată de faptul că separările de grafit vermicular prezintă o mai mare interdependență între ele, situație mai apropiată de cea constatată la fontele cu grafit lamelar.

În cazul pieselor cu pereți subțiri, conductibilitatea termică a fontelor cu grafit vermicular este apropiată de cea a fontelor cenușii, în special față de cele din mărcile superioare. La piesele cu pereți groși se mărește diferența față de fontele cu grafit lamelar, dar se micșorează în raport cu cele cu grafit nodular [109].

Dependența conductibilității termice față de forma grafitului și grosimea de perete a pieselor turnate este ilustrată în fig. 4.41 [109].

Fonta cu grafit vermicular, turnată în lingotiere de 12,0 t prezintă o conductibilitate termică apropiată celei înregistrate în lingotierele obținute din fontă cu grafit lamelar.

Conductibilitatea termică a unor fonte, cu diferite forme de grafit, dar de compoziție chimică similară (3,5...3,6%C, 2,5... ...2,6%Si, 0,3...0,4%Mn, 0,04...0,06%P, 0,004...0,006%S) este prezentată în fig. 4.42 [2].

Grafitul vermicular asigură fontei o conductibilitate termică ridicată (46,2...50,4 W/m.K), apropiată de cea a fontei cu grafit lamelar (56,7 W/m.K) și în același timp superioară celei cu grafit

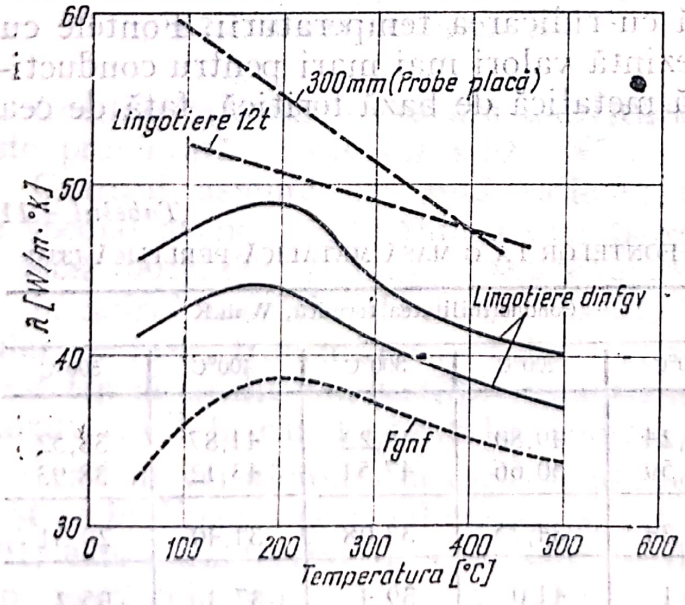


Fig. 4.41. Conductibilitatea termică a fontelor funcție de temperatură și grosimea de perete [109].

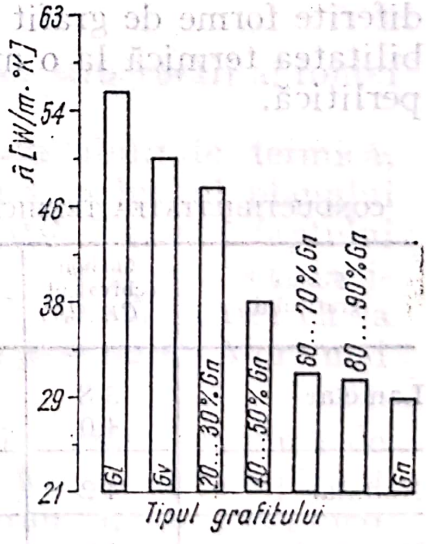


Fig. 4.42. Conductibilitatea termică a fontelor cu diferite forme de grafit [2].

nodular (29 W/m.K). Apariția grafitului nodular alături de cel vermicular determină micșorarea conductibilității termice. După aceeași autori, fontele cu grafit vermicular, cu 0...10% Gn au $\lambda = 50,4...52,5$ W/m.°K în timp ce la 10...20% Gn, $\lambda = 48,3...$ ...50,4 W/m.K, iar la 20...30% Gn, $\lambda = 38...42$ W/m.°K [9].

Alierea conduce la micșorarea conductibilității termice, influența elementelor de adaos (Cr) fiind de forma

$$\lambda = \lambda_0 - \ln \Sigma \text{Cr}. \tag{4.9}$$

Reunind o serie de date din literatura de specialitate, în lucrarea [256] se prezintă, comparativ, conductibilitatea termică a fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular, aliate și nealiate:

a) Fonte cu grafit lamelar nealiate, $\lambda = 44...59,5$ W/m.°K.

b) Fonte cu grafit lamelar aliate:

— cu 0,16% Cr + 0,31% Mo, $\lambda = 57$ W/m.°K;
— 0,14% Cr, $\lambda = 49...53,2$ W/m.°K;
— 0,28...0,32% Cr+0,30... ...0,32% Ni, $\lambda = 41,4...49,0$ W/m.°K;
— 0,3% Cr+0,3% Ni+0,3%Mo $\lambda = 41,4...45,6$ W/m.°K;

c) Fonte cu grafit nodular (0,15...1,5%Ni), $\lambda = 31,1...38,8$ W/m.°K;

d) Fonte cu grafit vermicular, $\lambda = 38,5...49,4$ W/m.°K.

Comparînd valorile conductibilității termice a fontelor cu grafit vermicular și a celor cu grafit lamelar, aliate cu Ni-Cr-Mo, folosite în mod frecvent la turnarea motoarelor termice, se constată că la temperaturi de 500...600°C, diferențele între ele sînt foarte scăzute [4].

O serie de rezultate privind *difuzivitatea termică* a fontelor cu grafit vermicular sînt prezentate în lucrările [361, 413].

Fontele cu grafit vermicular au fost obținute prin modificarea cu FeSiTiMgCe sau FeSiMgCe, iar compactitatea grafitului a fost apreciată cu ajutorul factorilor de formă K și Q (v. cap. 1).

Factorul K reprezintă raportul între suprafața separării de grafit (A) și cea a cercului circumscris (S), iar Q raportul între suprafața grafitului și perimetrul cercului (P) ($K = A/S$; $Q = 4\pi A/P^2$).

După datele autorilor amintiți, fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate prin valorile $K = 0,35...0,55$ iar $Q = 0,43...0,63$. Dependența difuzivității termice α a fontelor, la 300°C, funcție de compactitatea grafitului, exprimată prin factorii de formă K și Q este prezentată în fig. 4.43 [413].

Rezultă deci, că, la ambele tehnologii de obținere, fontele cu grafit vermicular prezintă, la 300°C, o difuzivitate termică cu-

Scanned with OKEN Scanner

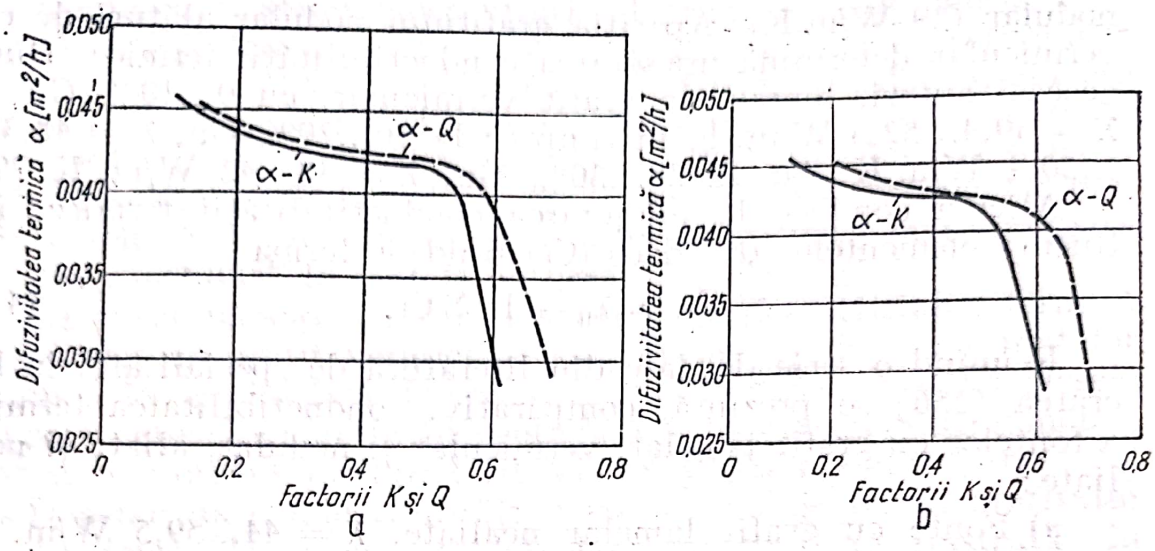


Fig. 4.43. Influența factorilor de formă a grafitului (K, Q) asupra difuzivității termice a fontelor (α) la modificarea cu FeSiTiMgCe (a) și FeSiMgCe (b) ($T = 300°C$).

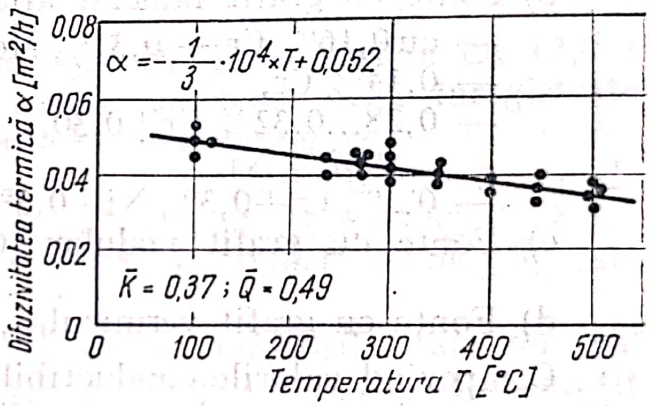


Fig. 4.44. Influența temperaturii asupra difuzivității termice a fontelor cu grafit vermicular [361]:
K și Q — factori de formă a grafitului.

prinsă în limitele 0,042...0,045 m²/h. Această caracteristică fizică a fontei depinde de temperatura la care au loc determinările, așa cum rezultă din fig. 4.44 [361].

La 300°C, dependența între difuzivitatea termică și factorul de formă K este prezentată și în tabelul 4.12 [361].

Analizînd difuzivitatea termică a fontelor modificate cu Mg-Ti, se constată că aceasta scade odată cu creșterea gradului de compactitate a grafitului.

Tabelul 4.12

INFLUENȚA FACTORULUI DE FORMĂ A GRAFITULUI K ASUPRA DIFUZIVITĂȚII TERMICE LA 300°C [361]

Factorul de formă K	0,15...0,16	0,34	0,49	0,61
Tipul grafitului	Gl	Gv	Gv	Gn
Difuzivitatea termică α, în m²/h	0,045...0,043	0,043...0,042	0,042	0,030

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

4.2.3. Dilatarea termică

La temperatura T(°C) lungimea unei probe se poate determina cu relația [90].

$$l_T = l_{20}\,[l + \alpha\,(T-20)] \quad [\text{mm}], \tag{4.10}$$

în care: l_{20} este lungimea la 20°C, în mm; α — coeficientul de dilatare termică liniară, în 1/°C.

Valorile coeficientului de dilatare termică liniară, în intervalul 20...100°C sînt prezentate în tabelul 4.9. Componența structurii, direct determinată de către compoziția chimică și condițiile de răcire, influențează valorile coeficientului de dilatare liniară a fontei datorită faptului că acesta prezintă valori diferite pentru constituenții structurali: $12{,}5 \cdot 10^{-6}$ pentru ferită, $(1{,}8...1{,}9) \cdot 10^{-6}$ la austenită, $(6{,}0...6{,}5) \cdot 10^{-6}$ în cazul cementitei, $11{,}6 \cdot 10^{-6}$ la pelită. În cazul grafitului, se disting valori de $(6{,}6...8{,}0) \cdot 10^{-6}$ paralel cu baza și $26 \cdot 10^{-6}$, perpendicular pe bază [13].

Datorită faptului că cementita are valori ale coeficientului de dilatare liniară inferioare celor înregistrate la grafit, fontele albe prezintă cele mai mici valori ale acestei caracteristici. Elementele grafitizante măresc, iar cele antigrafitizante micșorează coeficientul de dilatare.

Forma grafitului influențează relativ puțin valorile coeficientului de dilatare liniară. Se poate remarca totuși faptul că fontele cu grafit vermicular au un coeficient de dilatare superior fontelor cu grafit lamelar și a celor cu grafit nodular, perlitice și bainitice. Valori similare se înregistrează la fontele cenușii, din mărcile superioare (Fc 400) și la fontele cu grafit nodular feritice.

La creșterea temperaturii se înregistrează o mărire a coeficientului de dilatare liniară, atît în cazul fontelor cu grafit vermicular cît și a celor cu grafit lamelar, aliate cu Ni-Cr-Mo (fig. 4.45) [4].

Analizînd valorile coeficientului de dilatare liniară pentru mai multe tipuri de fonte utilizate în construcția de mașini, E. Nechtelberger constată diferențe scăzute, funcție de gradul de aliere și forma grafitului, o influență mai mare avînd-o intervalul

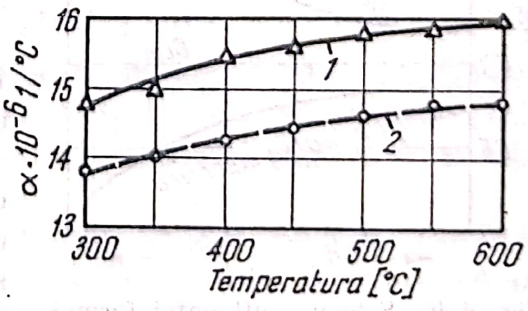


Fig. 4.45. Coeficientul de dilatare liniară, la creșterea temperaturii:
1 — Fgv; *2* — Fgl, aliate cu Ni—Cr—Mo [4].

de temperatură la care se raportează această caracteristică a fontei [256].

Luînd ca referință intervalul 0...400°C, se obțin, pentru coeficientul de dilatare liniară (α, în 10^{-6}/K), valorile:

a) Fonte cu grafit lamelar nealiate, $\alpha = 12{,}27...12{,}5 \times 10^{-6}$/°K

b) Fonte cu grafit lamelar aliate:

— (0,16...0,46%Cu)... $\alpha = 12{,}5...12{,}9 \times 10^{-6}$/°K;

— 0,10...0,37%Cr; 0,12...0,77%Ni; 0,12...0,57%Mo... ...$\alpha = 12{,}3...13{,}4 \times 10^{-6}$/°K;

c) Fonte cu grafit nodular, $\alpha = 13{,}0 \times 10^{-6}$/°K;

d) Fonte cu grafit vermicular, $\alpha = 12{,}0 \times 10^{-6}$/°K.

4.2.4. Proprietăți electrice

Rezistivitatea electrică ρ, inversul conductibilității electrice, variază de la un constituent structural la altul (ρ_0^{100} în $\mu\Omega$cm): 10 pentru ferită, 20 la perlită, 140 la cementită, 30 în cazul grafitului paralel cu baza și 10 perpendicular pe bază.

Grafitizarea mărește rezistivitatea electrică a fontelor, valorile minime obținîndu-se la oțelurile turnate și fontele maleabile (tabelul 4.9). Fontele cu grafit nodular prezintă valori inferioare celor înregistrate la fontele cu grafit lamelar, în timp ce grafitul vermicular asigură obținerea unor valori intermediare pentru rezistivitatea electrică. Creșterea valorii carbonului echivalent respectiv a gradului de grafitizare conduce la mărirea valorilor rezistivității electrice.

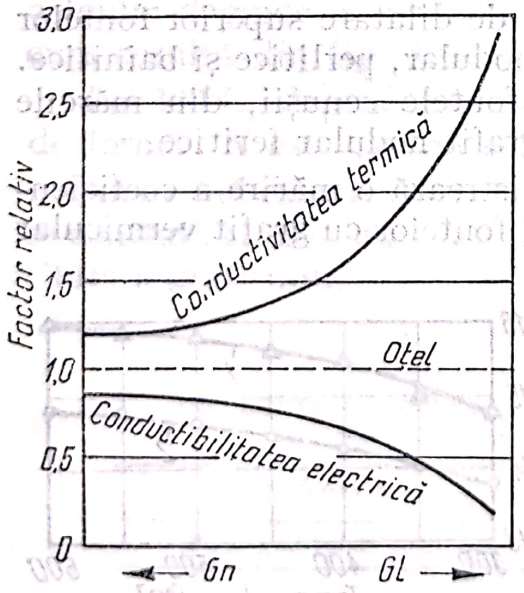


Fig. 4.46. Schema influenței formei grafitului asupra conductivității termice și electrice a fontelor, în comparație cu oțelul [223, 256].

Forma grafitului afectează în mare măsură proprietățile electrice ale fontei. Astfel, luînd egală cu unitatea valoarea conductibilității electrice în cazul oțelului, autorii amintiți constată o scădere pronunțată a acesteia, odată cu trecerea de la grafitul nodular la cel lamelar (fig. 4.46) [223, 256].

4.2.5. Proprietăți magnetice

Din punct de vedere magnetic fontele sînt caracterizate prin permeabilitatea magnetică maximă μ_{max}, inducția remanentă B_r și cîmpul coercitiv H_c (tabelul 4.9).

Creșterea cantității de grafit determină mărirea permeabilității magnetice. Astfel, în cazul fontelor cenușii, la Fc100, μ_{max} = = 450...1000 Gs/Oe, în timp ce la Fc 400, μ_{max} = 250...450 Gs/Oe.

În cazul tuturor fontelor, o structură feritică asigură o permeabilitate magnetică mai mare decît la o structură perlitică. La aceeași masă metalică de bază, fontele cu grafit nodular și cele maleabile au valori apropiate pentru permeabilitatea magnetică.

Fontele cu grafit vermicular ocupă, în general, valori intermediare, din punctul de vedere al proprietăților magnetice, între cele cu grafit nodular și lamelar [267, 406].

Datorită faptului că forma grafitului influențează în mare măsură proprietățile magnetice ale fontelor, determinarea acestora poate constitui o metodă de stabilire a gradului de compactitate a grafitului (v. cap. 2).

Reunirea mai multor proprietăți magnetice, în cadrul unui factor complex Z este propusă în lucrarea [267], prin relația

$$Z = 5{,}5\ (B_r/B_m + 0{,}005\ H_c + 12\,\mu_0 - 0{,}28\ (dB/dH) + + 0{,}40 \cdot B_m - 6{,}8, \qquad (4.11)$$

în care: B_r este inducția remanentă, în Gs; B_m — inducția magnetică maximă în Gs; H_c — cîmpul coercitiv, în Oe; μ_0 — permeabilitatea magnetică inițială, în Gs/Oe; dB/dH — permeabilitatea magnetică diferențială.

Cele mai sensibile la forma grafitului sînt caracteristicile dB/dH și Bm, definite de relațiile:

$$dB/dH = -0{,}038\ (\%Gn) + 6{,}24, \qquad (4.12)$$

$$Bm = 0{,}031\ (\%Gn) + 15{,}2. \qquad (4.13)$$

Factorul complex Z este mărit, la schimbarea tipului grafitului, în următoarea ordine: grafit lamelar tip C, Widmanstattam (W), (A, D, E), grafit vermicular (V) și nodular (N) (fig. 4.47 și fig. 4.48).

Rezultă că la fontele cu grafit lamelar Z = (—3,0)...(—0,1), la cele cu grafit vermicular Z = (—0,3)...(+0,5), în timp ce la fontele cu grafit nodular, Z = (+0,5)... (+1,5). Creșterea gradului de nodulizare determină mărirea factorului comple Z [267].

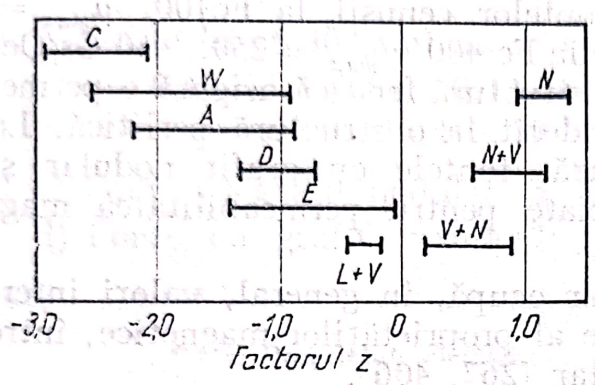


Fig. 4.47. Influența grafitului asupra factorului complex Z [267]:
C, W, A, D, E — grafit lamelar (L); V — grafit vermicular; N — grafit nodular.

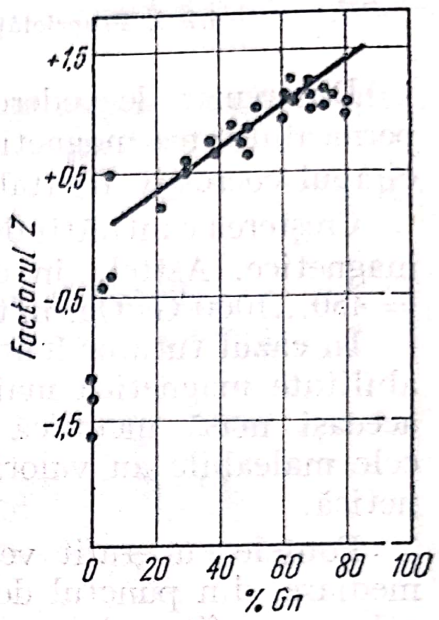


Fig. 4.48. Influența gradului de nodulizare asupra factorului complex Z [267].

4.3. Proprietăți tehnologice și de exploatare

4.3.1. Rezistența la oxidare

În prima parte a procesului are loc o oxidare a carbonului din grafit, oxidul de carbon astfel format părăsind fonta prin stratul de oxid. Îndepărtarea oxidului de carbon accentuează discontinuitățile din stratul de oxid, favorizînd în acest mod pătrunderea în continuare a oxigenului. Stratul de oxid, de la suprafața pieselor este bogat în oxizi de fier, în timp ce pe profunzime apare un amestec format din wustită și silicat de fier.

În interiorul peretelui piesei, în porii formați în urma oxidării grafitului, pătrund produsele procesului de oxidare a fierului, siliciului și manganului, respectiv FeO, Fe_2SiO_4 și Fe_2MnO_4, ce conțin 4...7%Si, pînă la 2,5%Mn și 60...65%Fe [292].

După același autor, oxidarea fontei cu grafit nodular decurge în mod similar. Stratul exterior de oxizi (cu 60...75%Fe) este bogat în oxizi de fier în timp ce stratul inferior mult mai compact și aderent la piesă, conține și SiO_2, MnO, cu 2...8%Si și 0,3%Mn [292]. Se consideră că la aceste tipuri de fonte nu se formează cruste de oxizi stratificate.

Oxidarea începe de la suprafața pieselor, de la nodulele de grafit aflate în acest plan. Locul nodulelor de grafit, rămas liber în urma oxidării carbonului, se umple cu oxizi de fier. Siliciul este concentrat în zonele din jurul acestor pori, unde atinge 37... ...68%. Oxidarea continuă pe adîncimea peretelui piesei, acest proces fiind frînat în cazul creșterii distanței dintre nodulele de grafit. Analiza cu ajutorul microsondei electronice a evidențiat difuzia fierului și a siliciului în direcția grafitului, unde conținutul de siliciu a crescut pînă la 10%, în timp ce manganul crește de la 0,2 la 0,5% [292].

Analizînd cauzele formării rețelei de arsuri în cazul lingotierelor se evidențiază faptul că procesul de oxidare este stimulat de procesul de transformare $\alpha \rightarrow \gamma$ [374].

La trecerea de la grafitul lamelar spre cel nodular, pătrunderea oxigenului are loc mai încet, atît prin spațiul dintre grafit-masă metalică cît și prin rețeaua de fisuri, apărute din cauza tensiunilor termice, determinate de apariția unui gradient de temperatură pe grosimea de perete (fig. 4.49).

Formarea fayalitei și wustitei în stratul oxidat este semnalată și de către lucrarea [39], care remarcă faptul că la formarea wustitei are loc o mărire de volum cu 76%. Zonele închise la culoare sînt constituite din fayalită iar cele de culoare cenușie din wustită. Zonele de culoare albă sînt rezultatul reducerii wustitei de către Si, Al, Mn.

Experimentările efectuate de către autorii acestei lucrări au evidențiat o serie de particularități ale comportării la oxidare a

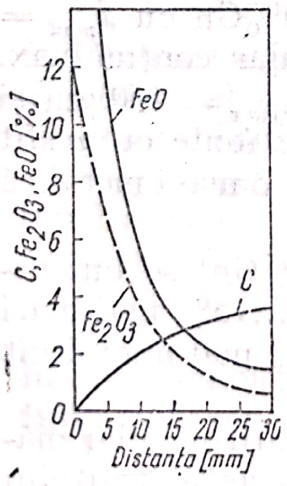


Fig. 4.49. Variația conținutului oxizilor de fier și a carbonului, pe adîncimea lingotierei [374].

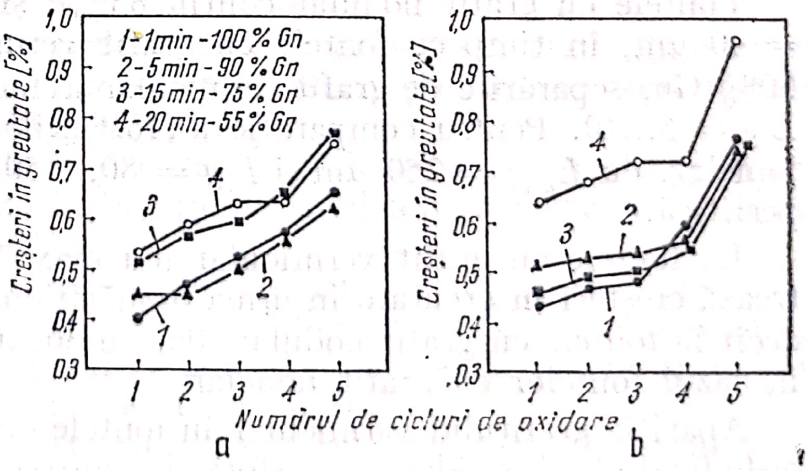


Fig. 4.50. Comportarea la oxidare a fontelor, menținute în stare lichidă după modificare [309]:
a — probe în stare turnată; *b* — probe uzate în prealabil.

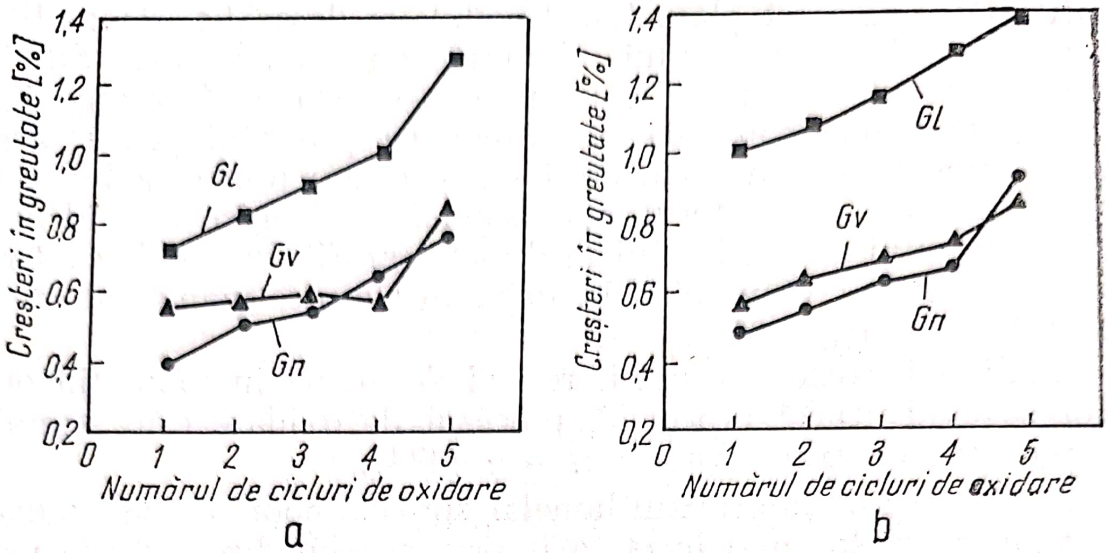


Fig. 4.51. Comportarea la oxidare a fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular [309]:

a — probe în stare turnată; *b* — probe uzate în prealabil.

fontelor cu grafit vermicular, în raport cu fontele cu grafit lamelar și nodular [303, 309, 319, 324].

Menținerea fontei cu grafit nodular, diferite perioade de timp, înainte de turnare, determină apariția în structură a grafitului vermicular ceea ce afectează comportarea la oxidare a fontelor (fig. 4.50) [309].

Comportarea la oxidare a fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular este prezentată în fig. 4.51 [309].

Fontele cu grafit nodular conțin 85%P și 90%Gn cu $d_{med} =$ $= 40$ μm, în timp ce fontele cu grafit vermicular conțin max. 30% Gn, separările de grafit vermicular avînd $L_{max} = 150$ μm și $L/g = 5...10$. Pentru comparație au fost utilizate fonte cu grafit lamelar, cu $L_{max} = 250$ μm și $L/g = 80...150$, la o masă metalică perlitică.

La fontele cu grafit vermicular (cu max. 30%Gn) se înregistrează creșteri în greutate în urma oxidării cu 10...15% mai mari decît la fontele cu grafit nodular, dar cu 30...60% mai mici decît în cazul fontelor cu grafit lamelar.

Apariția grafitului vermicular în fontele cu grafit nodular mărește tendința de oxidare a acestora, în timp ce asocierea grafitului vermicular cu cel lamelar conduce la creșterea rezistenței la oxidare a fontelor cenușii (fig. 4.52).

Din punctul de vedere al oxidării, fontele cu grafit vermicular ocupă o poziție intermediară, dar mai apropiată de comportarea fontelor cu grafit nodular (fig. 4.53).

Scanned with OKEN Scanner

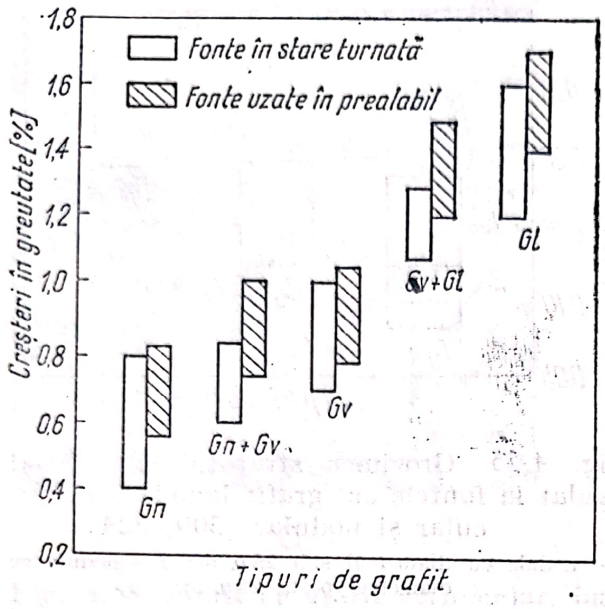
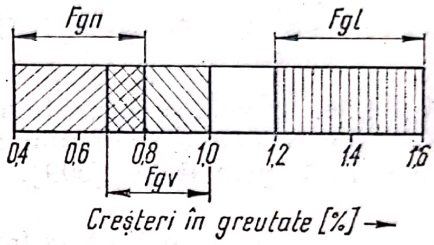


Fig. 4.52. Influența grafitului asupra oxidării fontelor [309].

Fig. 4.53. Poziția fontelor cu grafit vermicular din punctul de vedere al oxidării la 600°C [309].



Uzarea prealabilă accelerează oxidarea fontelor, datorită favorizării pătrunderii oxigenului prin microcanalele (microfisurile) apărute în urma procesului de frecare.

Sensibilitatea fontelor, în cadrul procesului de oxidare, față de solicitările anterioare oxidării, poate fi exprimată cu ajutorul factorului F calculat cu relația:

$$F = \frac{\Delta G_u}{\Delta G_i}, \qquad (4.14)$$

în care: ΔG_u reprezintă creșterile în greutate ale fontelor oxidate, supuse în prealabil unui proces de uzare, în %; ΔG_i — creșterile în greutate ale fontelor neuzate (inițiale), în %.

Fontele cu grafit vermicular sînt mai puțin afectate din punctul de vedere al oxidării de efectele uzării prealabile, decît fontele cu grafit nodular (fig. 4.54) [309].

După o perioadă de oxidare de 100 h, grosimea stratului superficial oxidat variază în funcție de tipul fontei, respectiv al grafitului (fig. 4.55) [309].

La fontele cu grafit vermicular (fig. 4.56) se înregistrează o grosime a stratului superficial oxidat comparabilă, în mare măsură, în cea a fontelor cu grafit nodular (la limita superioară a acestora), fiind însă net inferioară fontelor cu grafit lamelar.

În toate cazurile, stratul de oxid se concentrează în jurul separărilor de grafit, dar trecerea de la grafitul nodular la cel vermicular determină o extindere a zonei ocupate de masa metalică oxidată (fig. 4.57; fig. 4.58; fig. 4.59).

La aceleași condiții de oxidare, proporția masei metalice oxidate (în jurul separărilor de grafit) crește de la 25...56% (Gn) la 28...68% (Gn + Gv), 50...80% (Gv) și 90...100% (Gl).

Scanned with OKEN Scanner

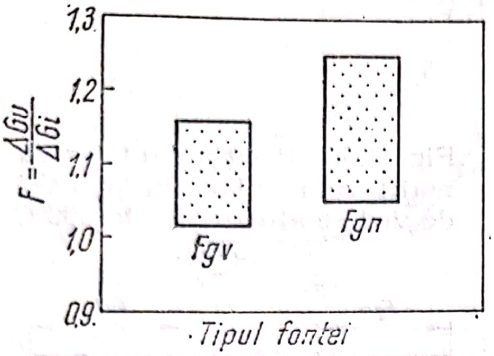


Fig. 4.54. Dependența gradului de oxidare al fontei de solicitarea mecanică prealabilă [309].

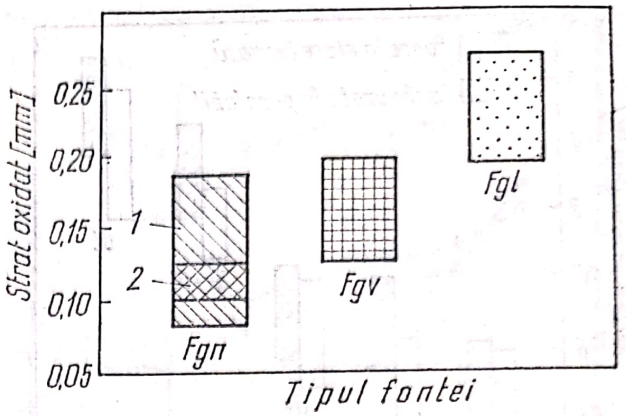


Fig. 4.55. Grosimea stratului superficial oxidat la fontele cu grafit lamelar, vermicular și nodular [309, 324]:

1 — nodule cu diametrul sub 25 μ m; *2* — nodule cu diametrul peste 25 μ m.

Comportarea la creștere și oxidare a fontelor de primă fuziune, cu grafit lamelar (I) și vermicular (II), comparativ cu cea a fontelor de cubilou (III), este prezentată în fig. 4.60 [303].

Probele utilizate la experimentări (∅ 17 ×45 mm) au fost turnate odată cu lingotierele, regimul de oxidare fiind următorul: încălzire pînă la 800°C, cu viteza de 390°C/h, menținere 6h la această temperatură și apoi o răcire cu cuptorul, cu 45°C/h.

Fontele de primă fuziune, cu grafit vermicular, utilizate la turnarea lingotierelor, au o rezistență la creștere și oxidare superioară fontelor nemodificate.

Fig. 4.56. Aspectul stratului de oxid la Fgv (200 : 1).

Fig. 4.57. Oxizii masei metalice în jurul separărilor de grafit vermicular (100 : 1) [309].

Scanned with OKEN Scanner

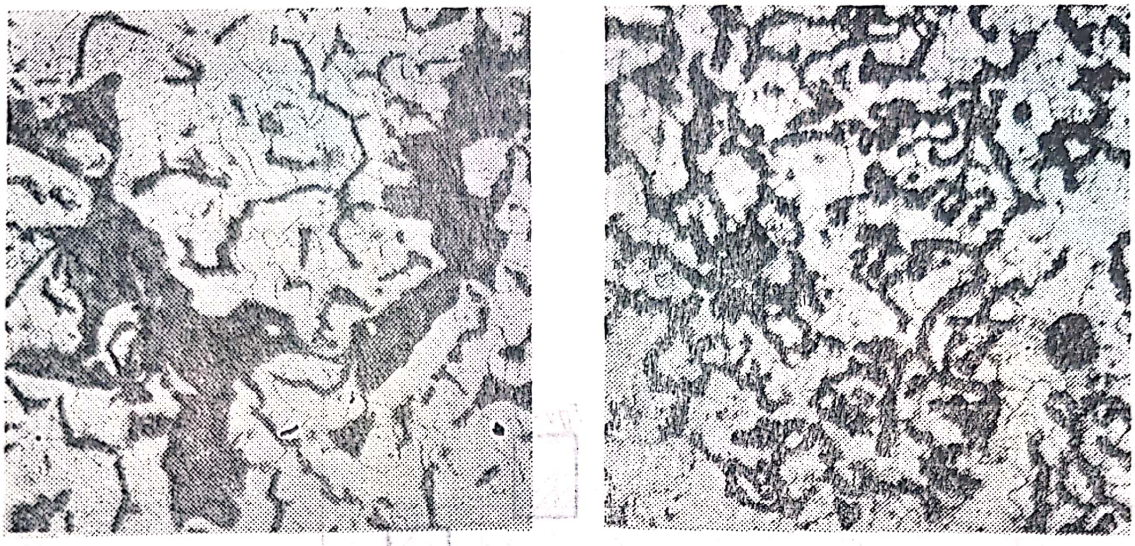


Fig. 4.58. Fonte cu grafit vermicular, înainte (*a*) și după oxidare (*b*) (200 : 1).

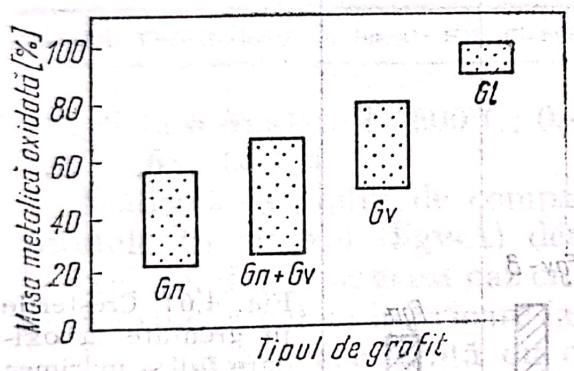
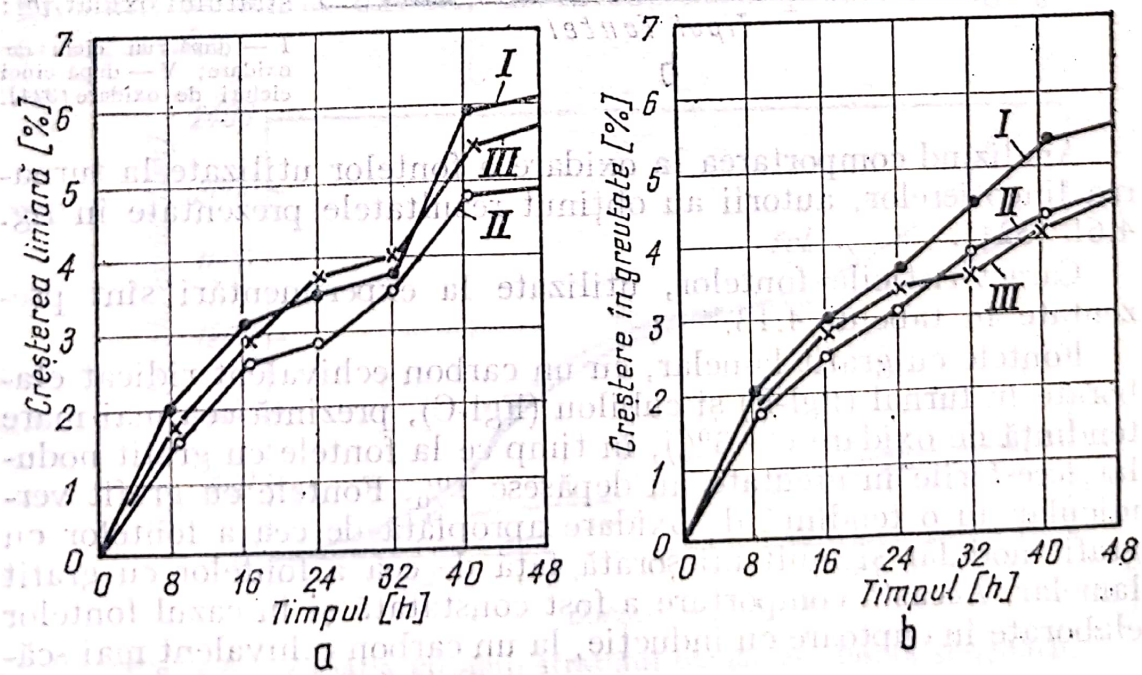


Fig. 4.59. Oxidarea masei metalice în funcție de tipul grafitului [309].

Fig. 4.60. Comportarea la creștere și oxidare a fontelor de primă fuziune cu grafit lamelar (*I*), vermicular (*II*) și a fontelor de cubilou (*III*) [303].



Scanned with OKEN Scanner

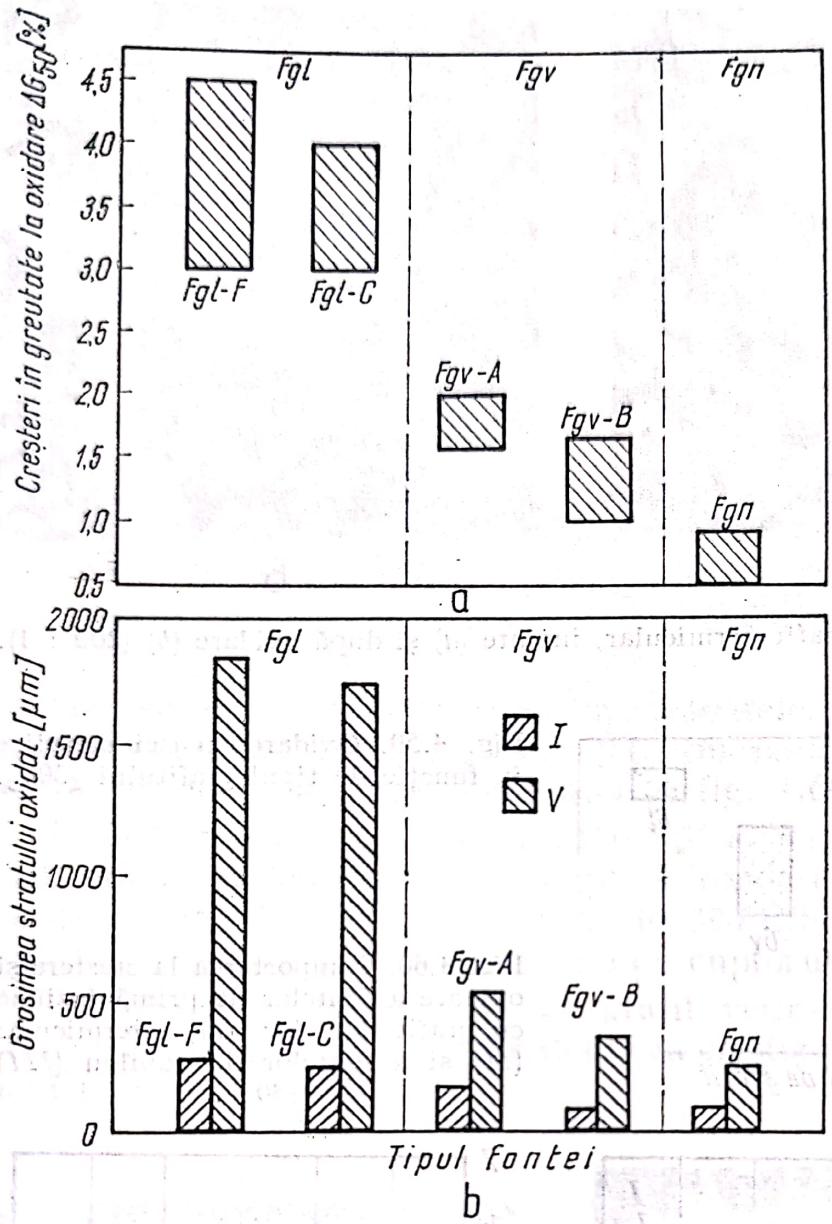


Fig. 4.61. Creșterile în greutate la oxidare (*a*) și mărimea stratului oxidat (*b*):

I — după un ciclu de oxidare; V — după cinci cicluri de oxidare [324].

Analizînd comportarea la oxidare a fontelor utilizate la turnarea lingotierelor, autorii au obținut rezultatele prezentate în fig. 4.61 [324].

Caracteristicile fontelor, utilizate la experimentări sînt prezentate în tabelul 4.13.

Fontele cu grafit lamelar, cu un carbon echivalent ridicat elaborate în furnal (Fgl-F) și cubilou (Fgl-C), prezintă cea mai mare tendință de oxidare ($> 3\%$), în timp ce la fontele cu grafit nodular, creșterile în greutate nu depășesc 1%. Fontele cu grafit vermicular au o tendință de oxidare apropiată de cea a fontelor cu grafit nodular și mult micșorată față de cea a fontelor cu grafit lamelar. Această comportare a fost constatată și în cazul fontelor elaborate în cuptoare cu inducție, la un carbon echivalent mai scă-

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.13

CARACTERISTICILE FONTELOR SOLICITATE LA OXIDARE [324]

Tipul fontei	Probe în stare turnată mm	Compoziția chimică				Ferită %	Grafit %	Mărimea grafitului
		C %	Si %	Si/Mn	CE %			
Fgl-F	20	3,6...4,0	1,6...2,9	2,1...3,5	4,0...4,7	2...20	> 12	58...120 μm
Fgl-C	20	3,3...3,8	1,5...2,2	2,0...3,0	3,8...4,5	3...20	> 12	56...110 μm
Fgv-A	200 (lingotieră)	3,6...3,8	1,6...1,8	3,0...4,0	4,1...4,4	80...90	> 12	L/g=20...40
Fgv-B	20	3,6...3,8	1,6...1,8	3,0...4,0	4,1...4,4	55...70	> 12	L/g =4...7
Fgn	20	3,8...3,9	2,5...2,6	4,0...5,0	4,5...4,7	15...40	> 12	30...80 μm

Observație. Fgl—F—fontă de furnal; Fgl—C—fontă de cubilou.

zut și la o oxidare la 600°C: 0,4...0,8% Fgn, 0,7...1,0% la Fgv și 1,2...1,6% la Fgl.

Scăderea gradului de compactitate a grafitului vermicular în peretele lingotierei (Fgv-A) determină o creștere a sensibilității la oxidare, dar și în acest caz creșterea în greutate în urma oxidării se menține la valori inferioare în raport cu fontele cu grafit lamelar.

În strînsă concordanță cu creșterea în greutate este variația grosimii stratului oxidat, de la suprafața probelor (fig. 4.61, *b* și fig. 4.62).

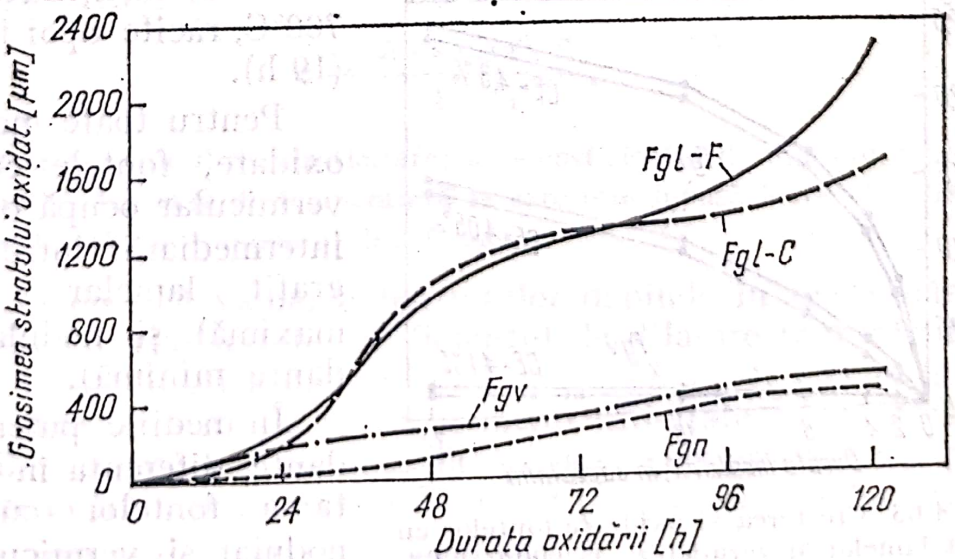


Fig. 4.62. Variația grosimii stratului oxidat cu durata solicitării.

Scanned with OKEN Scanner

După primul ciclu de oxidare se obțin valori de 100...200 μm pentru grosimea stratului oxidat, indiferent de tipul grafitului, în timp ce la o durată mai mare de solicitare (5 cicluri oxidare) apar diferențe evidente între fonte.

În cazul fontelor cu grafit nodular se constată o creștere lentă a grosimii stratului oxidat, în timp ce la fontele cu grafit lamelar are loc o creștere accentuată la primele solicitări. La fontele cu grafit vermicular viteza maximă de oxidare se înregistrează la primul ciclu, după care aceasta se atenuează.

O încălzire îndelungată a unor lingotiere în aer, timp de 32 săptămîni, la 500°C, a arătat că fontele cu grafit lamelar și vermicular, de aceeași compoziție chimică, au o comportare identică. La 600°C, creșterea Fgv este mai mică decît la Fgl, în timp ce rezistența la oxidare este mai mare (fig. 4.63) [108, 109].

În cazul fontelor cu grafit vermicular, stratul de oxid pătrunde în adîncimea piesei prezentînd un contur neregulat, în timp ce grafitul nodular favorizează formarea unui strat de oxid compact, cu contur regulat.

Comportarea fontelor, cu diferite forme de grafit în condițiile variației caracterului oxidant al atmosferei de lucru este prezentată în tabelul 4.14 [71]. Au fost utilizate probe ∅ 20 ×10 mm, încălzirea avînd loc într-un cuptor cu bare de silită, în tub de pirolan, cu volumul de 0,34 dm³. Probele au fost încălzite timp de 1 h pînă la 700°C, menținute 4 h la 700°C, răcite apoi în cuptor (19 h).

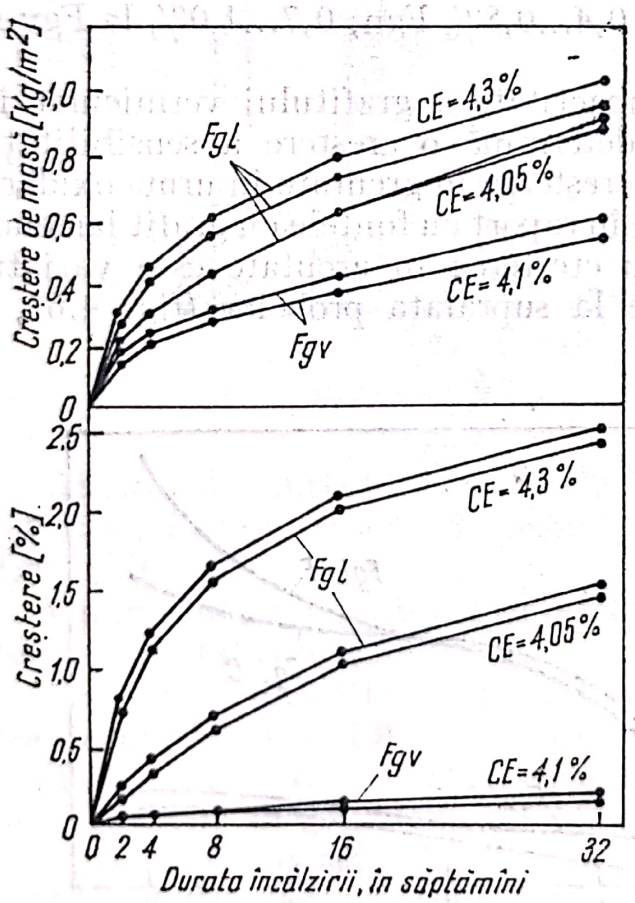


Fig. 4.63. Creșterea și oxidarea fontelor cu grafit lamelar și vermicular la 600°C [108, 109].

Pentru toate mediile de oxidare, fontele cu grafit vermicular ocupă o poziție intermediară, între cele cu grafit lamelar (oxidare maximă) și nodular (oxidanre minimă).

În mediile puternic oxidante, diferența în comportarea fontelor cu grafit nodular și vermicular este scăzută, dar se accentuea-

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.14

GRADUL DE OXIDARE A FONTELOR ÎN DIFERITE MEDII [71]

Tipul grafitului	Creșterile în greutate (în %) ale fontelor după 120 h de oxidare în mediile:					
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	$\Delta G(M_1 - M_5)$ %
Gl	1,35	1,13	1,15	1,10	1,04	23
Gl + Gv	1,18	0,92	1,06	0,85	0,68	42
Gv	1,02	0,74	0,98	0,72	0,60	41
Gv + Gn	0,98	0,65	0,70	0,58	0,45	54
Gn	0,92	0,60	0,60	0,40	0,38	59

*) M_1 – În aer, cuptor deschis (tiraj maxim)
M_2 — În aer, cuptor închis (tiraj minim)
M_3 — În gaze rezultate din arderea CH_4 (CO_2 ridicat)
M_4 — În gaze rezultate din arderea CH_4 ($CO_2 + CO$)
M_5 — În gaze rezultate din arderea CH_4 (CO_2 scăzut)

ză odată cu micșorarea capacității de oxidare a atmosferei de lucru.

Odată cu mărirea gradului de compactitate a separărilor de grafit, se accentuează diferența, în ceea ce privește creșterea în greutate, între medii puternic și slab oxidante.

4.3.2. Rezistența la șoc termic

Cauza principală a unor rezistențe scăzute în condiții de șoc termic o constituie tensiunile apărute în procesul de încălzire și răcire repetată a fontelor.

Nivelul tensiunilor apărute în aceste condiții poate fi calculat cu relația [295]:

$$\sigma = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot S}{1 - \upsilon}, \qquad (4.15)$$

în care: E este modulul de elasticitate; α — coeficientul de dilatare termică; ΔT — diferența de temperatură la care este supusă fonta; S — factor de formă; υ — numărul lui Poisson.

Rezultă deci că valoarea tensiunilor depinde în mare măsură de modulul de elasticitate, coeficientul de dilatare termică, diferența de temperatură a ciclului ($T_{încălzire} - T_{răcire}$), precum și de anumite caracteristici de formă a piesei solicitate la șoc termic. Tensiunile apărute vor conduce la apariția unor microfisuri prin dezvoltarea cărora se ajunge la fisurarea (crăparea) pieselor [132].

Amorsarea și dezvoltarea microfisurilor depind însă nu numai de nivelul tensiunilor dar și de rezistența fontei în condiții de șoc

Scanned with OKEN Scanner

(rezistență și alungire), precum și de capacitatea acesteia de a asigura transferul de căldură (conductibili atc termică).

Luînd în considerare principalii factori care influențează rezistența la șoc termic a fontelor (RST), poate fi scrisă următoarea dependență:

$$RST = f\left(\frac{R, A, \lambda, M}{E, \alpha, \Delta T, K}\right), \qquad (4.16)$$

în care: RST reprezintă rezistența la șoc termic; R — rezistența la tracțiune; A — alungirea fontelor la tracțiune; E — modulul de elasticitate; α — coeficientul de dilatare termică; λ — conductivitatea termică a fontei; ΔT — diferența de temperatură a ciclului ($T_{încălzire} - T_{răcire}$); M — factor de masă (volum); K — coeficient global de concentrare a tensiunilor.

Modulul de elasticitate E, care caracterizează rezistența la deformarea plastică a fontei, determină mărirea volumului tensiunilor interne și ca atare și sensibilitatea la fisurare.

Creșterea diferenței între temperaturile maxime și minime ale ciclului de șoc termic (ΔT) favorizează apariția fisurilor la durate mai mici de solicitare, o acțiune similară avînd și concentratorii de tensiuni (K): incluziuni, retasuri, sufluri, orificii etc.

Tenacitatea exprimată prin valorile rezistenței la tracțiune (R) și alungirii (A) constituie un element important în asigurarea unei rezistențe superioare la șoc termic, ca și conductibilitatea termică (λ).

În aceleași condiții de încălzire-răcire, factorul masă M determină mărirea rezistenței la șoc termic.

Luînd în considerare principalii factori care determină rezistența la șoc termic, se constată că fontele, cu diferite forme de grafit, prezintă atît avantaje (+) cît și dezavantaje (—) (tabelul 4.15).

Tabelul 4.15

FACTORII CARE DETERMINĂ REZISTENȚA LA ȘOC TERMIC [321]

Tipul fontei	Rezistența la tracțiune R, N/mm²	Alungirea A, %	Modulul elasticitate E, kN/mm²	Coeficientul dilatare termică α, $\times 10^{-6}$	Conductivitatea termică, λ, W/m.K
cu grafit lamelar	100...400	max. 1,0	75...155	11...12	50...67
cu grafit vermicular	300...500	1,5...5	140...170	12...14	36...48
cu grafit nodular	350...900	3...25	165...185	11,3...13	25...40

Scanned with OKEN Scanner

Fontele cu grafit lamelar posedă conductibilitate termică ridicată și modul de elasticitate scăzut (+), dar au rezistențe mecanice și alungiri scăzute (—).

Fontele cu grafit nodular sînt caracterizate prin rezistență și alungire ridicată (+), dar posedă conductibilitate termică mai mică și un modul de elasticitate mai ridicat (—).

Fontele cu grafit vermicular sînt apropiate de cele cu grafit nodular din punctul de vedere al rezistenței și alungirii și de cele cu grafit lamelar în ceea ce privește conductibilitatea termică.

Luînd în considerare factorii de influență, E. Nechtelberger stabilește nivelul maxim de tensiuni care apar în fontele cu grafit lamelar, vermicular și nodular în cazul solicitării la șoc termic, în intervalele 100—20°C și 400—20°C (tabelul 4.16) [256].

Tabelul 4.16

CALCULUL TENSIUNILOR TERMICE LA FONTELE CU GRAFIT LAMELAR, VERMICULAR ȘI NODULAR [256]

Temperatura, în °C Ciclul de tratament termic, ΔT	100°C 100—20 = 80°C				400°C 400—20 = 380°C			
Tipul fonite	Fc 200	Fc 300	Fgn 400	Fgv 350	Fc 200	Fc 300	Fgn 400	Fgv 350
Modulul de elasticitate E, în kN/mm²	112	132	155	136	102	122	140	121
Coeficient dilatare termică α, 10^{-6}/°K	9,8	9,8	11,4	9,8	12,3	12,0	13,0	12,0
Coeficientul Poisson ν	0,26	0,26	0,275	0,265	0,25	0,25	0,27	0,26
Tensiuni termice σ_{max}, în N/mm²	59,3	69,9	97,5	72,5	317,8	370,9	473,7	372,8
Conductivitatea termică, în W/m°K	51,9	44,0	38,1	42,0	44,8	40,2	37,6	40,0
Factor de corecție $C = \lambda_{Fc200}/\lambda_{Fc200}$ Fng400 Fgv300	1,0	1,18	1,36	1,24	1,0	1,11	1,19	1,12
Tensiuni termice corectate $\sigma_{cor} = C\,\sigma_{max}$	59,3	82,5	132,6	89,9	317,8	411,7	563,7	417,5

Pentru calcule a fost utilizată relația :

$$\sigma_{max} = \frac{E\,\alpha\,\Delta T}{2\,(1-\upsilon)} \quad [\text{N/mm}^2]. \tag{4.17}$$

Se constată că la fontele cu grafit nodular se ating valorile maxime ale nivelului tensiunilor termice, în timp ce fontele cu grafit vermicular se comportă, din acest punct de vedere, similar

Scanned with OKEN Scanner

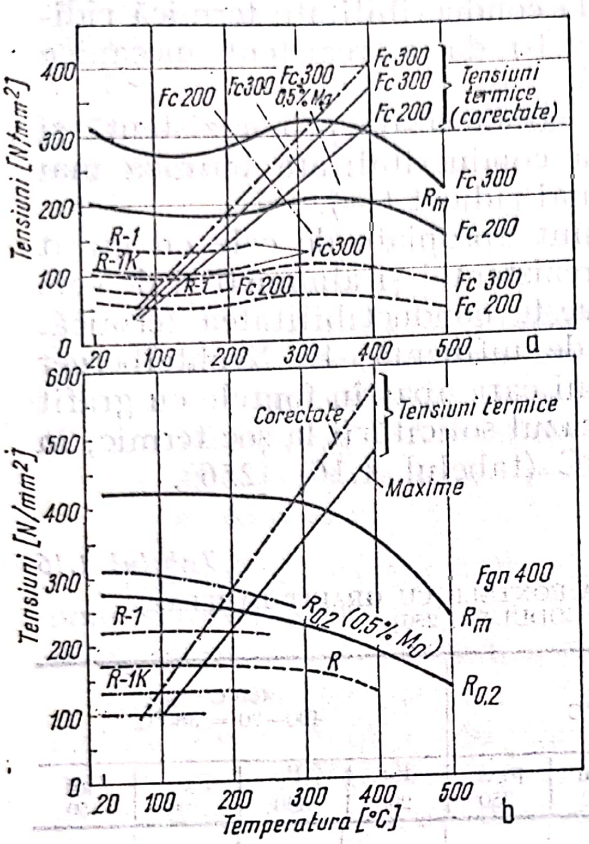


Fig. 4.64. Nivelul tensiunilor acumulate la variația temperaturii (v. tabelul 4.16) în cazul fontelor cu grafit lamelar (*a*) și nodular (*b*) [256].

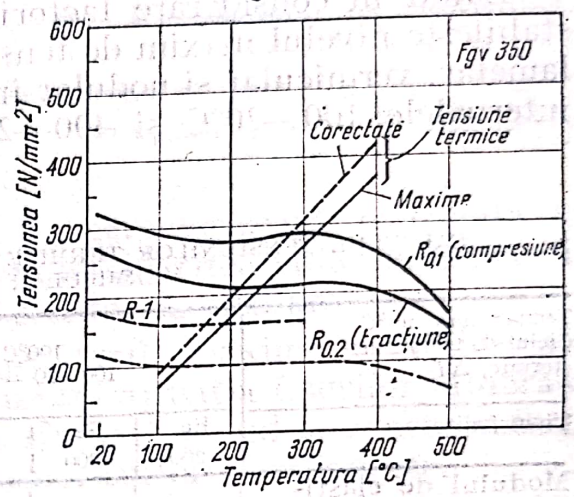


Fig. 4.65. Influența temperaturii asupra caracteristicilor mecanice și nivelului tensiunilor termice acumulate la șoc termic (v. tabelul 4.16) în cazul fontelor cu grafit vermicular Fgv 350 [256].

fontelor cenușii, cu caracteristici mecanice apropiate. Avînd în vedere faptul că la solicitarea la șoc termic conductibilitatea termică are un rol deosebit, se propune introducerea unui coeficient de corecție, prin care se raportează conductibilitatea termică a fontelor analizate la cea obținută la Fc 200 (tabelul 4.16). În acest mod se obțin valori mai mici pentru nivelul tensiunilor termice atinse (σ_{cor}).

La creșterea valorii temperaturii maxime de încălzire are loc nu numai micșorarea principalelor caracteristici mecanice ale fontelor dar se înregistrează și o mărire a nivelului tensiunilor termice (fig. 4.64; fig. 4.65) [256].

Stabilind anumiți parametri ai solicitării la șoc termic (caracteristicile probelor, ΔT, timpul de încălzire-răcire) și avînd în vedere faptul că coeficientul Poisson are valori practic egale pentru toate fontele, se recurge la o serie de factori, simplificați, pentru a caracteriza comportarea fontelor [256]:

$$X_t = \frac{E\,\alpha}{\lambda}, \tag{4.18}$$

$$EF = \frac{R\,\lambda}{\alpha\,E}. \tag{4.19}$$

Factorul X_t concretizează nivelul tensiunilor termice acumulate, în timp ce EF rezistența la șoc termic a fontei.

Scanned with OKEN Scanner

În tabelul 4.17 sînt prezentați acești factori, în cazul unei temperaturi maxime de 400°C [256].

Tabelul 4.17

FACTORII CARE CARACTERIZEAZĂ COMPORTAREA LA ȘOC TERMIC A FONTELOR [256]

Caracteristica	Tipul fontei		
	Fgl	Fgv	Fgn
Modulul de elasticitate E, în daN/mm²	9220...12530	13500	15500
Coeficient de dilatare termică α, în m/m°C	12,0...12,5	12	12,5
Conductivitatea termică λ, în cal/cm.s. °C	0,093...0,107	0,085	0,07
$R_{0,2}$ la 400°C, în daN/mm²	14,4...31,0	20	22
$X_t = \frac{E\,\alpha}{\lambda}$	1,04...1,63	1,91	2,77
$EF = \frac{R_{0,2}\,\lambda}{\alpha E}$	13,5...19,0	10,5	7,5

Avînd în vedere faptul că rezistența la șoc termic este determinată de un complex de factori, iar cele trei tipuri de fonte posedă caracteristici diferite din acest punct de vedere, este necesară luarea în considerare a tuturor factorilor de influență, pentru a se putea stabili comportarea reală la o astfel de solicitare, a fontelor cu diferite forme de grafit.

Experimentările efectuate de către autorii acestei lucrări au permis evidențierea mecanismului de apariție și dezvoltare a microfisurilor, precum și punerea în evidență a principalilor factori de influență.

Experimentările au fost efectuate pe o instalație realizată în Institutul politehnic București și prezentată în fig. 4.66, care realizează cicluri de încălzire-răcire în condiții determinate [321, 322].

Probele cu $\varnothing$ 20 $\times$(8...20) mm au fost încălzite într-un cuptor electric tubular menținut la temperatura de 900$\pm$10°C, răcirea avînd loc în apă. Timpul de încălzire a fost de 52 s iar cel de răcire în apă de 19 s.

În cazul *grafitului vermicular* microfisuri apar în masa metalică la contactul cu separările de grafit, ocupînd poziții care depind de gradul de compactitate al acestora.

Astfel, în cazul unor separări de grafit vermicular, cu compactitate redusă, microfisurile se găsesc amplasate la capetele grafitului (ca la grafitul lamelar), în timp ce la compactități mai mari microfisurile sînt dispuse atît la capete cît și radial (similar grafitului nodular).

Scanned with OKEN Scanner

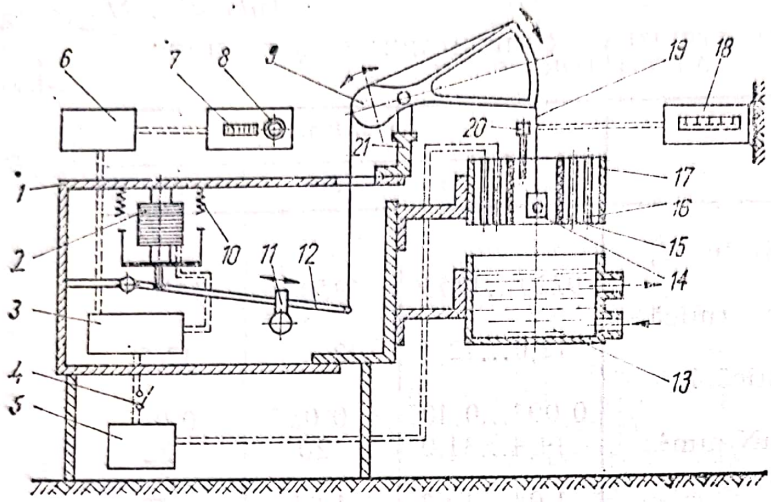


Fig. 4.66. Schema instalației de încercări la loc termic a Institutului Politehnic București [321, 322]:
1 — carcasă; *2* — electromagnet cu miez metalic mobil; *3* — bloc-relee; *4* — întrerupător; *5* — sursă de alimentare cu energie electrică la 220 V și 50 Hz; *6* — transformator redresor 220 Vc.a. — 12 Vc.c.; *7* — contor cicluri; *8* — lampă control; *9* — sector circular amplificator; *10* — resort de amortizare pentru miezul mobil al electromagnetului; *11* — contragreutate; *12* — pîrghie; *13* — bazin de răcire; *14* — probă; *15* — tub de cuarț; *16* — bare de silită; *17* — cuptor electric tubular; *8* — milivoltmetru indicator de temperatură; *19* — fir de nichelină pentru suspendarea probei; *20* — termocuplu (Pt-PtRh 13%); *21* — suportul pîrghiei

Ca și la celelalte fonte, microfisurile au tendința de a lega între ele separările de grafit (fig. 4.67).

Viteza de dezvoltare maximă a fisurilor se realizează prin microfisurile de la capetele separărilor de grafit, care conduc la formarea unor fisuri principale și apoi la macrofisuri.

Microfisurile amplasate radial pe separările de grafit se dezvoltă mai puțin, conducînd doar la formarea unor rețele fine.

Asocierea grafitului vermicular cu cel lamelar sau nodular determină o serie de schimbări în ceea ce privește modul de inițiere și dezvoltare a microfisurilor.

Astfel, în cazul în care, alături de grafitul vermicular în structură apar și lamele grosolane de grafit fisurile se vor dezvolta cu precădere prin acestea, constituindu-se în acest mod o fisură principală. În acest timp, separările de grafit vermicular prezintă doar microfisuri, slab dezvoltate.

Prezența în structura fontei a unor incluziuni nemetalice favorizează apariția și dezvoltarea fisurilor care le leagă între ele.

În cazul în care alături de grafitul vermicular structura conține și grafit nodular, cele două forme de grafit participă diferit la procesul de fisurare.

Astfel, în timp ce se formează fisuri principale, prin unirea separărilor de grafit vermicular, nodulele se află abia în faza de apariție a microfisurilor.

În primul stadiu al solicitării la șoc termic (de formare a microfisurilor) lungimea maximă a microfisurilor, pentru fontele cu grafit vermicular, în raport cu celelalte tipuri de fonte, este prezentată în tabelul 4.18 [321]. Luînd ca referință fonta cu grafit

Scanned with OKEN Scanner

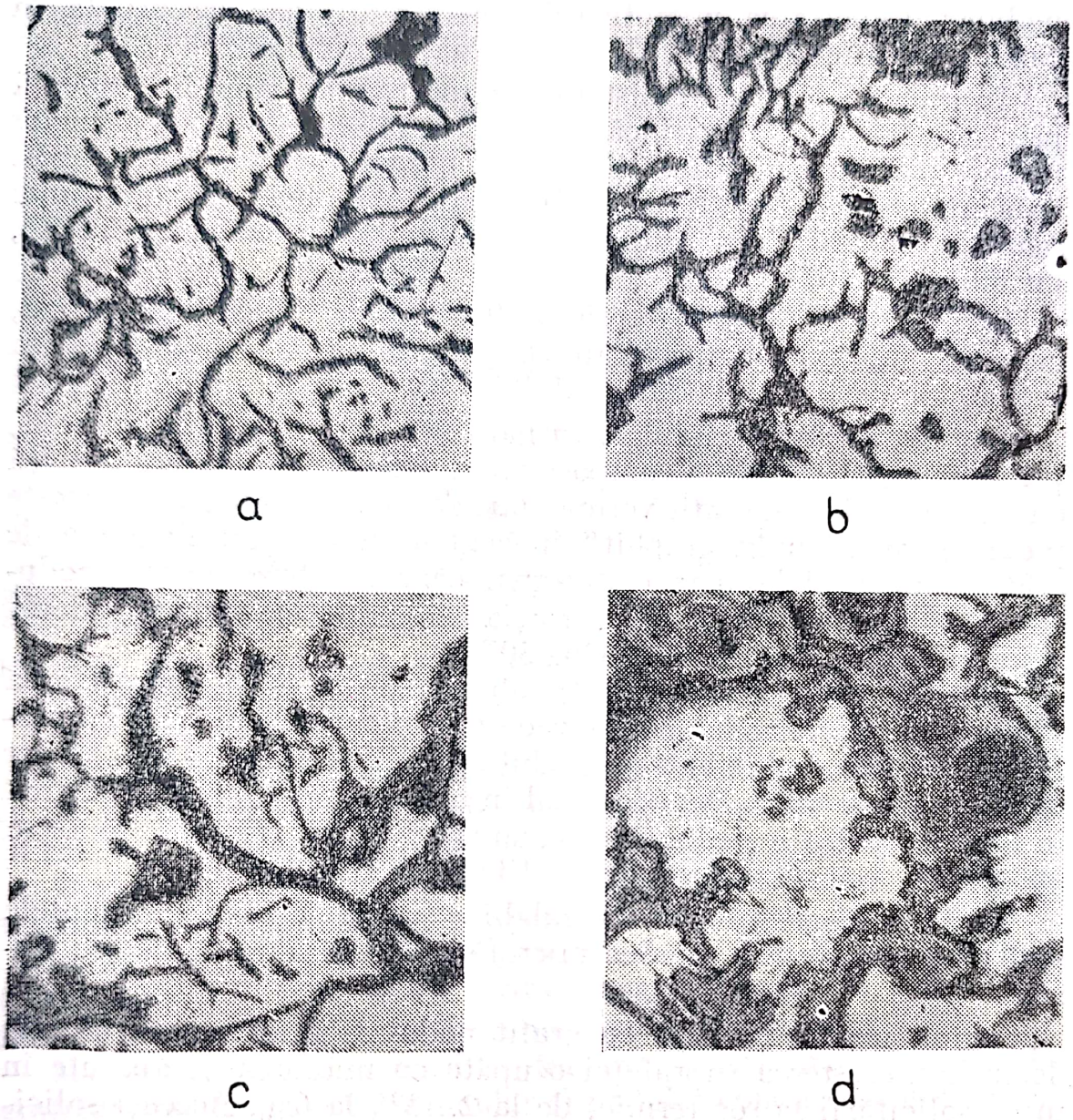


Fig. 4.67. Apariția și dezvoltarea fisurilor la solicitarea la șoc termic a fontelor cu grafit vermicular.

Tabelul 4.18

COMPORTAREA LA ȘOC TERMIC A FONTELOR CU GRAFIT LAMELAR, VERMICULAR, NODULAR [321]

Caracteristica	Rapoarte caracteristice Fc : Fgv : Fgn
Lungimea maximă a microfisurilor în primul stadiu de solicitare	5 : 3 : 1
Rezistența la șoc termic	1 : 1,25 — 1,4 : 1,6 — 1,8

Scanned with OKEN Scanner

nodular dezvoltarea microfisurilor este mult mai accentuată în cazul grafitului lamelar, decît a celui vermicular.

În ceea ce privește rezistența la șoc termic, pusă în evidență prin numărul de cicluri încălzire-răcire, pînă la apariția primelor fisuri, vizibile cu ochiul liber (1 : 1), față de fontele cu grafit lamelar (tip A), fontele cu grafit vermicular au o rezistență mai mare cu 25...40%, în timp ce fontele cu grafit nodular (tip K), cu 60...80% [321].

Comportarea la șoc termic a fontelor cu grafit vermicular, cu grad ridicat de compactitate, se apropie în mare măsură de cea a fontelor cu grafit nodular, de tip L.

Fontele cu grafit nodular, turnate in piese cu grosime mare de perete (lingotiere), au o comportare la șoc termic practic identică cu cea a fontelor cu grafit vermicular, datorită faptului că în aceste piese apare „Chunky-graphit" în centrul termic iar nodulele de grafit au un grad de compactitate mai scăzut, fontele cu grafit nodular fiind mai sensibile la variația grosimii de perete, decît cele cu grafit vermicular [306, 307].

În cazul unor piese cu pereți subțiri (sub 20 mm), comportarea fontelor cu grafit nodular se dovedește a fi superioară celor cu grafit vermicular, indiferent de gradul de compactitate al separărilor de grafit vermicular. Doar în cazul în care ponderea „petelor negre" în fontele cu grafit nodular este mare, cele două tipuri de fonte se apropie în ceea ce privește sensibilitatea la fisurare.

În cazul unor solicitări prealabile (uzare și oxidare), fontele sînt sensibilizate la formarea microfisurilor în condiții de șoc termic.

Astfel, uzarea fontelor cu grafit nodular, prin frecare uscată, determină creșterea suprafeței ocupate cu microfisuri, apărute în urma solicitării la șoc termic, de la 2...3% la 6%. Aceeași solicitare afectează puțin comportarea la șoc termic a fontelor cu grafit lamelar.

În cazul fontelor cu grafit vermicular, uzarea prealabilă accentuează tendința de formare a fisurilor în urma șocului termic, dar mult mai puțin decît în cazul grafitului nodular.

Oxidarea prealabilă a fontei determină de asemenea intensificarea procesului de formare și dezvoltare a microfisurilor. Probe din fontă cu grafit vermicular și nodular au fost supuse unui proces de oxidare, după care a avut loc solicitarea la șoc termic.

Mărirea duratei de oxidare prealabilă accelerează procesul de inițiere a microfisurilor și de formare a rețelei de fisuri. Șocul termic aplicat determină un proces de fisurare a separărilor de grafit, care este cu atît mai rapid cu cît solicitarea la oxidare prealabilă a fost mai îndelungată (fig. 4.68).

Scanned with OKEN Scanner

Fig. 4.68. Distrugerea separărilor de grafit sub acțiunea oxidării și șocului termic.

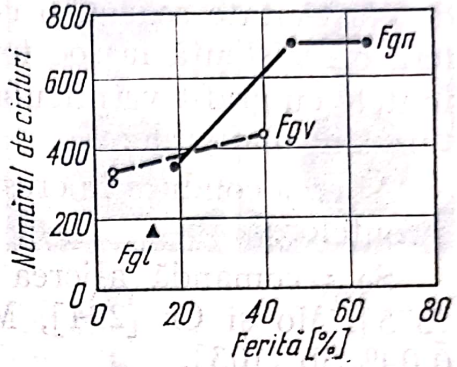


Fig. 4.69. Rezistența la șoc termic a fontelor [380]

Fontele cu grafit vermicular de primă fuziune au o rezistență la șoc termic cu 68% mai mare decît cele nemodificate și cu 28% în raport cu fontele cu grafit lamelar, de cubilou [303].

Modificarea fontelor cu 0,2%Si-MM a determinat o creștere a rezistenței la tracțiune, la temperatura ambiantă, cu 34%, iar a rezistenței la cald (300...450°C) cu 19...24%, fisurile la șoc termic (probe ∅20 ×30 mm, 600°C—20°C) apărînd după 20...23cicluri, față de 10...12 înregistrate la fontele cu grafit lamelar [197].

Mărirea cantității de modificator, care determină trecerea de la grafitul lamelar la cel vermicular și nodular conduce la îmbunătățirea rezistenței la șoc termic a unor fonte utilizate la turnarea lingotierelor [357].

Poziția intermediară a fontei cu grafit vermicular din punctul de vedere al rezistenței la șoc termic precum și influența masei metalice de bază rezultă și din fig. 4.69 [380].

Analizînd mai multe materiale metalice, pentru turnarea chiulaselor de la motoarele Diesel se testează comportarea la șoc termic (450°C-apă) a fontelor cu grafit lamelar perlitice, aliate și nealiate, precum și a fontelor cu grafit nodular și vermicular [256].

Au fost utilizate fonte cenușii nealitate, cu 3,2...3,3% pînă la 3,7...3,8%C, 1,75...1,9% la 2,0...2,1% Si, 0,7% Mn, max. 0,15% P, max. 0,08%S. Alierea acestor fonte a avut loc cu 0,3%Cr + + 0,3%Ni; 0,3%Cr + 0,3%Mo; 0,3%Cr + 0,3%Ni + 0,3%Mo.

Scanned with OKEN Scanner

Fontele cu grafit nodular au fost obținute prin modificarea cu magneziu (3,7%C, 2,5%Si, 0,04%Mn, 0,02%P, 0,008%S, 0,08%Mg), iar cele cu grafit vermicular, prin modificarea cu 0,09% CeMM, compoziția chimică de bază fiind similară celei de la Fgn.

Caracteristicile mecanice obținute sînt $R_m = 180...320$ N/mm² pentru Fgl, $R_m = 400$ N/mm² și $A = 23\%$ pentru Fgn și $R_m = 335$ N/mm² și $A = 6\%$ la Fgv.

În condițiile date de solicitare, autorul recomandă fontele cu grafit lamelar, cu carbon ridicat, aliate, caracterizate prin modul de elasticitate scăzut și conductibilitate ridicată, ceea ce le conferă o rezistență la șoc termic ridicată. Se recomandă trecerea la fontele cu grafit vermicular numai atunci cînd condițiile de solicitare sînt mai grele.

Alierea conduce la creșteri însemnate a rezistenței la șoc termic a fontelor.

Se recomandă alierea cu 0,1...0,2%Sb sau 0,2%Sb + 1%Al [375], Mo și Cr [294], Mo sau V [116], 0,024%Al, 0,044%Bi, 0,09%Sb [103].

Luînd ca punct de referință comportarea fontelor de cubilou, rezistența la șoc termic a altor tipuri de fonte utilizate la turnarea lingotierelor este prezentată în tabelul 4.19 [324].

Tabelul 4.19

COMPORTAREA LA ȘOC TERMIC A FONTELOR [324]

Tipul fontei	Rezistența relativă la șoc termic
Fontă din cubilou, cu grafit lamelar	1
Fontă de furnal, cu grafit lamelar	0,84
Fontă de cuptor electric, cu grafit lamelar	1,1
Fontă de furnal, cu grafit vermicular	1,28
Fontă de cuptor electric, cu grafit vermicular	1,25...1,4
Fontă cubilou, cu grafit nodular (cu pete negre)	1,3...1,5
Fontă de cuptor electric, cu grafit nodular	1,6...1,8

Fontele cu grafit lamelar de primă fuziune (de furnal) au o sensibilitate ridicată la fisurare în condiții de încălziri și răciri repetate, datorită neomogenității structurale și prezenței în structură

Scanned with OKEN Scanner

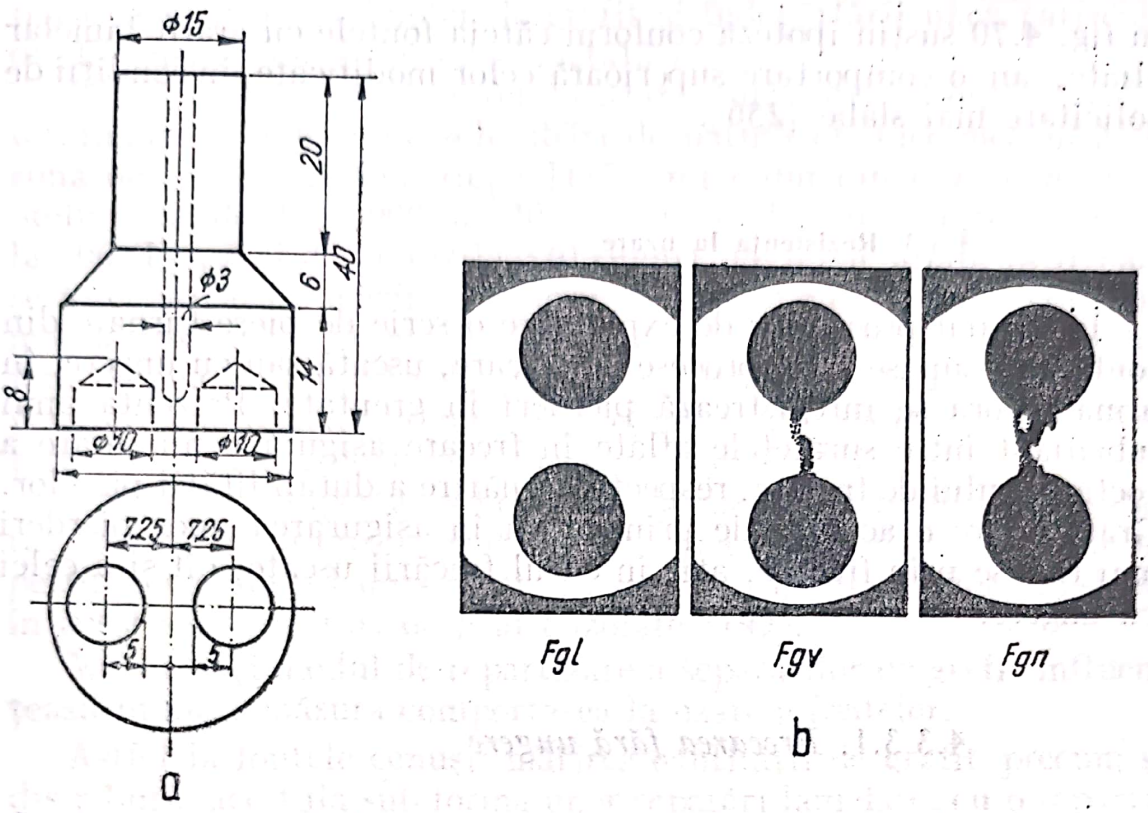


Fig. 4.70. Probe utilizate pentru determinarea rezistenței la șoc termic (*a*) și fisurarea probelor după 200 cicluri (*b*) [256].

a unor separări grosolane de grafit, gaze, incluziuni etc., care joacă rolul unor amorse de microfisuri. Modificarea acestor fonte pînă la forma de grafit vermicular mărește rezistența la soc termic cu 50...60%.

Fontele cu grafit vermicular de a doua fuziune (cubilou sau cuptor cu inducție), îmbinînd caracteristici mecanice și termice la valori ridicate sînt caracterizate de o rezistență la șoc termic, apropiată de cea a fontelor cu grafit nodular.

În cazul lingotierelor turnate (piese cu pereți groși)diferențele, în comportarea la șoc termic între fontele cu grafit vermicular și nodular se micșorează.

Analizînd lungimea totală a fisurilor obținute în urma solicitării la șoc termic, se constată o serie de diferențe între fontele cu diferite forme de grafit. Astfel, după 200 de cicluri incălzire-răcire, la Fgv și Fgn se obțin fisuri cu adîncimea de 3,0 mm, în timp ce la fontele cu grafit lamelar, aliate cu Cr-Ni-Mo, după 600 de cicluri se obțin fisuri de 1,95 mm. După 100 de cicluri au fost obținute crăpături cu adîncimea de 0,7 mm la Fgv, 1,4 mm la Fgn și 0,55 mm la Fgl [256].

Utilizind probele prezentate în fig. 4.70, *a*, se obține fisurarea, după 200 de cicluri la 460°C, conform fig. 4.70, *b*. Datele prezentate

Scanned with OKEN Scanner

în fig. 4.70 susțin ipoteza conform căreia fontele cu grafit lamelar aliate, au o comportare superioară celor modificate, în condiții de solicitare mai slabe [256].

4.3.3. Rezistența la uzare

În timpul proceselor de exploatare o serie de piese turnate din fontă sînt supuse unor procese de frecare, uscată sau cu ungere, în urma cărora se inregistrează pierderi în greutate. Prezența unui lubrifiant între suprafețele aflate în frecare asigură o micsorare a coeficientului de frecare, respectiv o mărire a durabilității pieselor. Grafitul are o acțiune de prim ordin în asigurarea unor pierderi mai reduse prin frecare, atît în cazul frecării uscate, cît și a celei cu ungere.

4.3.3.1. *Frecarea fără ungere*

Pe suprafețele aflate în contact, sub sarcină, apar o serie de fenomene, care favorizează sau dimpotrivă micșorează uzura fontei.

Efectuind o analiză fractografică a suprafețelor supuse la frecare, se constată existența unor deformații, care duc la apariția unor fisuri în masa metalică [425]. În timp ce la fontele cenușii deformațiile sînt distribuite în toată suprafața, la cele cu grafit nodular se constată o concentrație a acestora în jurul separărilor de grafit. Cea mai mare parte din microfisuri pornesc de la separările de grafit și incluziunile nemetalice. Avînd în vedere faptul că suprafața totală a separărilor de grafit nodular este de 2...3 ori mai mică decît cea a lamelelor de grafit, localizarea deformațiilor în stratul superficial în cazul Fgn este cu mult mai mare decît la Fc. Acest lucru duce la apariția unor fenomene de rupere a masei metalice nu numai pe nodule și incluziuni cît și între ele, avînd ca rezultat separarea unor particule mari. La fontele cenușii, masa metalică este îndepărtată sub forma unor fracții mărunte.

În jurul unor separări de grafit apar zone ale masei metalice deformată plastic.

În cazul Fgn lățimea fisurii se dublează în zonele cu separări de grafit, care se rup, dar zona în care se răspîndesc aceste frînturi de grafit nu depășesc 2...3 diametre ale nodulelor inițiale.

După aceeași autori [425], la sarcini relativ scăzute, viteza de uzare la Fgn este mai scăzută decît la Fc, dar sensibilitatea fontelor cu grafit nodular crește la sarcini mai mari, datorită deformării

Scanned with OKEN Scanner

plastice în jurul nodulelor de grafit și îndepărtării unor particole de dimensiuni mari din masa metalică.

Diferențele în comportarea la uzare, între oțel și fontă sînt determinate de o serie de schimbări de natură chimico-mecanică în zona de frecare. Astfel, după [117], microduritatea (H_μ) în cazul oțelului scade de la 900 la 720, în timp ce la fonte crește de la 249 la 400 (Fgnp) și de la 192 la 320 (Fgnf). Pe fețele aflate în frecare se înregistrează o mărire a vitezei de difuzie a carbonului și deformarea separărilor de grafit. Rezistența la uzare mai mare a fontei față de cea a oțelului este pusă pe seama creșterii microdurității perlitei, schimbării parametrilor rețelei feritei datorită deformării plastice, acțiunii de lubrefiere a grafitului [117].

Analizînd comportarea la o uzare abrazivă a fontelor s-a constatat că rezistența crește odată cu mărirea gradului de dispersie al perlitei, dar un rol important îl joacă și grafitul, recomandîndu-se în acest sens separări de grafit izolate [199].

Mărimea și modul de repartizare a separărilor de grafit influențează în mare măsură comportarea la uzare a fontelor.

Astfel la fontele cenușii mărirea cantității de grafit precum și distribuția acestuia sub forma unor separări lamelare, cu o repartizare uniformă pînă la aglomerări cu grad de izolare mic determină pierderi mai mici în greutate. Apariția in structură a grafitului tip *D*, în cuiburi și rozetă (*B*) accentuează pierderile în greutate [325].

Acțiunea negativă a grafitului punctiform (*D*) este semnalată și de către alți autori.

Astfel, datorită faptului că distanța între ramurile grafitului interdendritic este foarte scăzută, se remarcă îndepărtarea unor particule ale masei metalice dintre separările de grafit, cu dimensiuni de 3...10 μm [425]. Pe de altă parte, cantitatea mare de ferită pe care o conțin aceste fonte accentuează procesul de uzare.

Mărirea cantității de perlită din structură și a gradului de dispersie a acesteia (în special prin aliere) micșorează pierderile prin uzare, pentru toate formele de grafit.

Experimentările efectuate de către autorii acestei lucrări au evidențiat o serie de particularități ale comportării la uzare a fontelor cu grafit vermicular [308, 324].

Încercarea la uzare a fost efectuată prin frecarea probelor din fontă, sub sarcină, pe un disc din oțel manganos, aflat în mișcare, ca și probele.

Menținerea fontei, în stare lichidă, după modificare determină apariția, în structură, a grafitului vermicular, alături de cel nodular precum și micșorarea cantității de perlită ceea ce favorizează uzarea fontei [308].

Scanned with OKEN Scanner

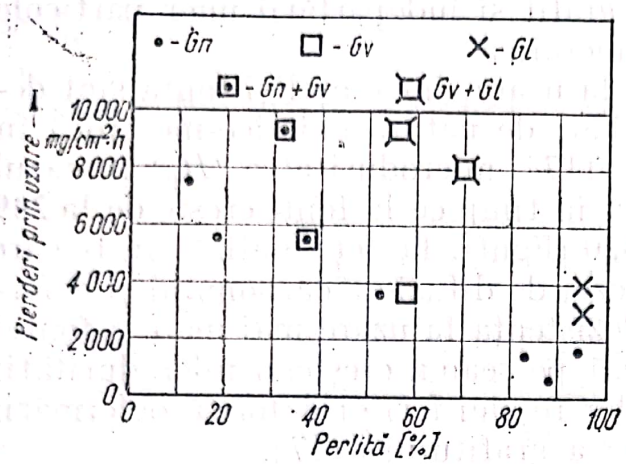


Fig. 4.71. Influența cantității de perlită asupra pierderilor la uzare a fontelor cu diferite forme de grafit [308].

Fontele, cu același grad de saturație în carbon (S_c = = 0,88), solidificate în condiții similare, conțin în structură cantități variabile de perlită, funcție de tipul grafitului [308]. În timp ce fontele cu grafit lamelar sînt caracterizate de un conținut de 100%P. la fontele cu grafit nodular masa metalică conține 85%, iar în cazul grafitului vermicular se obține 60%P. Fontele cu grafit vermicular, desi conțin mai puțină perlită decît cele cu grafit lamelar, prezintă pierderi la uzare mai mici decît acestea, cea mai bună comportare avînd-o fonta cu grafit nodular.

Creșterea proporției de perlită (P) din structură conduce la scăderea pierderilor la uzare (P_{uz}), indiferent de tipul grafitului (fig. 4.71), conform relațiilor:

$$P_{uz} = 7486 - 70\ (\%P)\ [mg/cm^2.h], \qquad (4.20)$$

$$P_{uz} = 8307 - 54{,}2\ (\%P)\ [mg/cm^2.h]. \qquad (4.21)$$

Relația (4.20) se referă numai la fontele cu grafit nodular, în timp ce relația (4.21) cuprinde fontele cu grafit lamelar, vermicular și nodular.

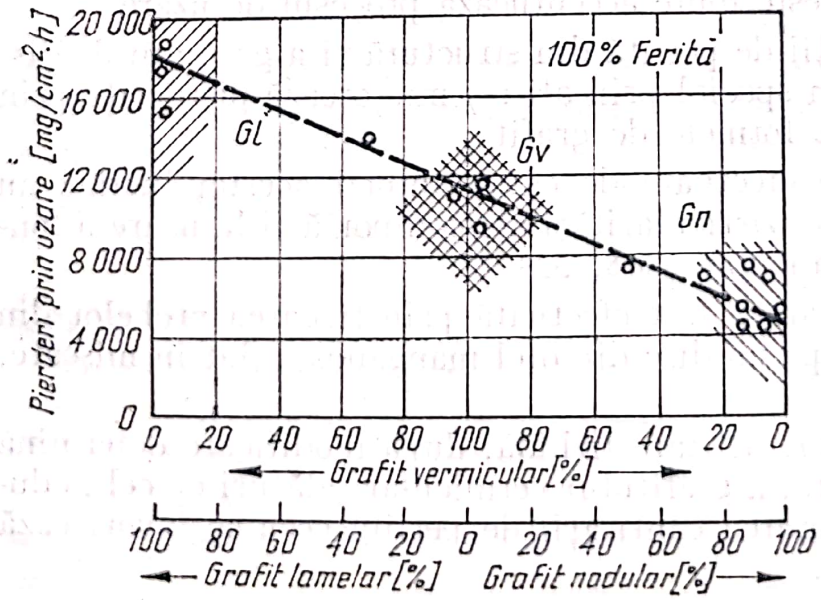


Fig. 4.72. Influența grafitului asupra pierderilor la uzare la fontele feritice [308].

Scanned with OKEN Scanner

La o aceeași masă metalică de bază, pierderile prin uzare sînt influențate în mare măsură și de forma grafitului, așa cum rezultă din fig. 4.72 [308] și tabelul 4.20 [324].

Tabelul 4.20

INFLUENȚA TIPULUI GRAFITULUI ASUPRA PIERDERILOR LA UZARE [324]

Masa metalică de bază	Pierderi la uzare, în mg/cm².h, în funcție de tipul grafitului				
	100% Gl	40% Gl 60% Gv	100% Gv	50% Gv 50% Gn	100% Gn
100% F	15000... 20000	—	9000... 11000	7000... 9000	5000... 8000
40...50% F (rest perlită)	—	9500	3950	—	3500

Grafitul nodular asigură cele mai mici pierderi prin uzare, acestea înregistrînd cele mai mari valori în cazul grafitului lamelar, în timp ce grafitul vermicular asigură o comportare intermediară. Apariția grafitului lamelar în fontele cu grafit vermicular determină creșteri importante ale pierderilor prin uzare. Prezența grafitului vermicular în structura fontelor cu grafit nodular afectează rezistența la uzare a acestor fonte.

Prezența unei cantități mai mari de ferită în structura fontelor cu grafit vermicular conduce la creșterea diferenței în comportare față de fonta cu grafit nodular, dar totuși pierderile la uzare rămîn mai mici decît în cazul fontelor cu grafit lamelar perlitice.

Scăderea gradului de compactitate a nodulelor de grafit și apariția unor forme degenerate de grafit (tip N-ASTM) în structura fontelor cu grafit nodular micșorează diferența față de comportarea la uzare a fontelor cu grafit vermicular.

Prezența „petelor negre" (oxisulfurile de magneziu) în structură afectează într-o mare măsură comportarea la uzare a fontelor cu grafit nodular, astfel încît pierderile prin uzare ale acestor fonte pot să le depășească pe cele ale fontelor cu grafit vermicular (fig. 4.73) [324].

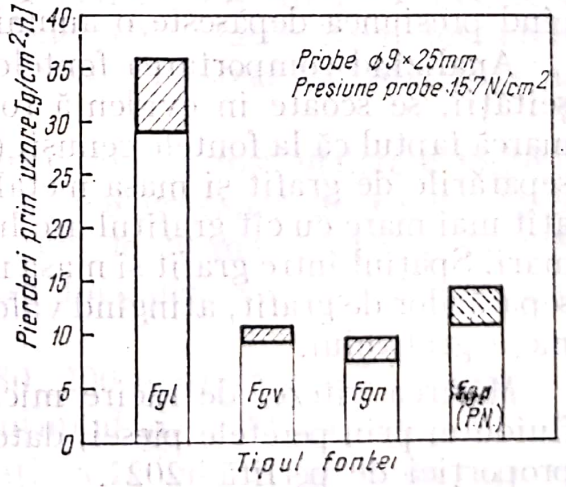


Fig. 4.73. Comportarea la uzare a fontelor cu grafit lamelar (Fgl), vermicular (Fgv), nodular (Fgn) și cu grafit nodular și pete negre (Fgn—PN) [324].

Scanned with OKEN Scanner

4.3.3.2. *Frecarea cu ungere*

Grafitul influențează în mare măsură comportarea la frecare cu ungere (metal-metal) a fontelor. Astfel, după [199] cea mai mică rezistență la o astfel de solicitare o determină grafitul cu dimensiuni reduse (interdendritic și punctiform), precum și cel sub formă de rozetă (B). De asemenea, rezultate necorespunzătoare au fost obținute și în cazul unor lamele de grafit de dimensiuni mai mari (peste 125 μm). Se remarcă faptul că o rezistență ridicată la uzare (0,02... ...0,09 mg/1000 m frecare) este asigurată de către separări de grafit izolate, de dimensiuni 25...125 μm.

Acțiunea negativă a grafitului interdendritic, în cazul turnării unor lagăre de alunecare, este remarcată și de către [263], care arată că la C_{leg} = ct, mărirea lungimii lamelelor de grafit determină micșorarea uzării. Recomandînd separări de grafit cu L = 100... ...250 μm și g = 3...8 μm, autorul amintit consideră că grafitul interdendritic nu participă la frecare, dar determină ruperi ale masei metalice, datorită efectului său de crestare deosebit de accentuat.

4.3.4. Etanșeitatea

Pentru piesele care lucrează la presiuni ridicate, ca de exemplu cele pentru hidroaparatură, se impune asigurarea unei etanșeități sporite, respectiv a unei rezistențe ridicate față de penetrarea unui fluid aflat sub presiune

Din acest punct de vedere fontele pot fi considerate ca fiind corpuri poroase, conținînd sufluri, microretasuri, incluziuni, precum și separări de grafit, care permit penetrarea fluidului, atunci cînd presiunea depășește o anumită valoare critică.

Analizînd comportarea fontelor din punctul de vedere al etanșeității, se scoate in evidență rolul grafitului [200...202]. Se remarcă faptul că la fontele cenușii (CE = 4,0...4,3%), distanța între separările de grafit și masa metalică este de 0,05...4 μm, fiind cu atît mai mare cu cît grafitul are lungimea și grosimea la valori mai mari. Spațiul între grafit și masa metalică nu este uniform în lungul separărilor de grafit, atingînd valori maxime în zona grosimii maxime a grafitului.

Mărirea vitezei de răcire micșorează capacitatea de filtrare a fluidului prin peretele piesei, datorită finisării grafitului și măririi proporției de perlită [202].

Creșterea valorii carbonului echivalent determină mărirea cantității de grafit și a spațiilor grafit-masă metalică, astfel că are loc scăderea atît a densității cît și a etanșeității [114].

Scanned with OKEN Scanner

Modificarea fontelor precum și microalierea masei metalice de bază (Cu, Sn, Ni, Cr, Mo) determină creșteri importante în ceea ce privesc valorile etanșeității [200, 324, 326, 327, 328].

Forma grafitului, respectiv gradul său de compactitate, afectează în mare măsură capacitatea de penetrare a fluidului sub presiune, respectiv etanșeitatea. Este cunoscut faptul că fontele cu grafit nodular și cele maleabile sînt caracterizate de valori ridicate ale etanșeității, superioare celor obținute în cazul fontelor cenușii (fig. 4.74) [76]. Fontele cu grafit nodular și maleabile au o structură feritică, iar cele cenușii, perlitică.

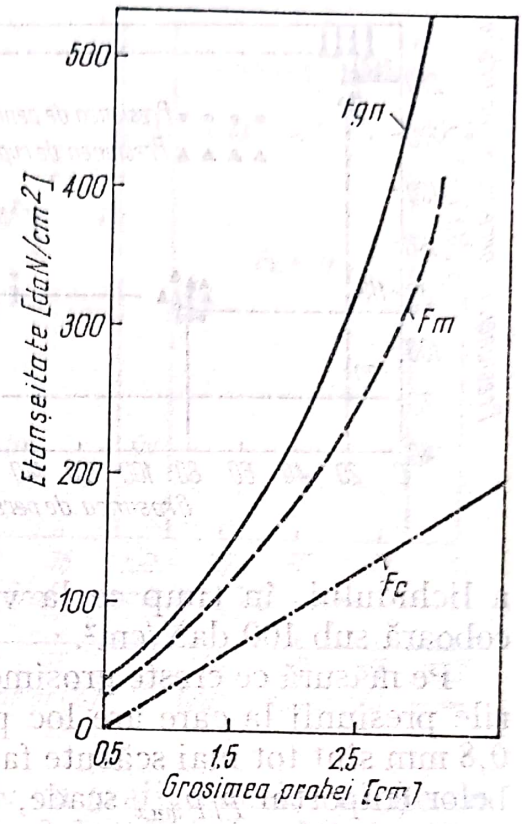


Fig. 4.74. Influența grosimii de perete asupra etanșeității fontelor [76].

Experimentările efectuate de către autorii acestei lucrări au evidențiat comportarea fontelor cu grafit vermicular, din punctul de vedere al etanșeității, în comparație cu fontele cenușii și cu grafit nodular [324, 327, 328]. În cadrul experimentărilor au fost utilizate probe cu grosimea de 0,8 mm, fluidul (apa) diind supus la presiuni crescînde în intervalul 0...300 daN/cm². Ca indicator general de exprimare a etanșeității este utilizată presiunea (p) la care se realizează începerea penetrării lichidului, prin probele cu grosime constantă (0,8 mm). Probele pentru încercări au fost prelucrate din probe cu grosimea de perete, în stare turnată, cuprinsă în limitele 20...200 mm.

Într-o primă serie de experimentări au fost utilizate fonte cu grafit vermicular turnate în probe cu grosimea de perete de 20, 80 și 200 mm. Probele cu grosimea de 20 mm conțin peste 95% grafit vermicular, raportul între lungimea și grosimea acestuia (L/g) nedepășind 3,1.

La grosimi de perete mari (80, 200 mm), raportul L/g crește la valorile 27...31, aceste fonte conținînd circa 90% ferită.

Valorile presiunii de penetrație a lichidului (p) și de rupere a probelor (p_{max}) sînt prezentate în fig. 4.75.

Grafitul vermicular de maximă compactitate (L/g = 2,o...3,1) asigură valori de circa 250 daN/cm² pentru presiunea de penetrație

Scanned with OKEN Scanner

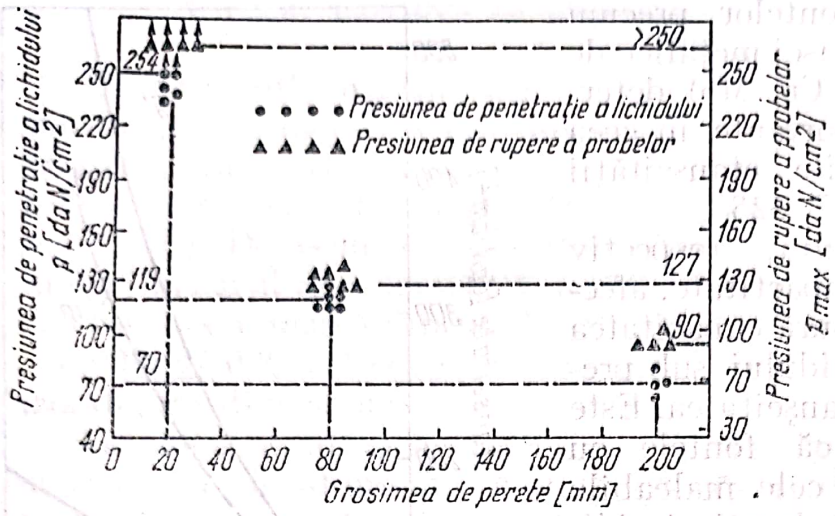


Fig .4.75. Presiunea de penetrație a lichidului (p) și de rupere a probelor (p_{max}), în cazul fontelor cu grafit vermicular, funcție de grosimea de perete în stare turnată [327, 328].

a lichidului, în timp ce la valori $L/g = 29...31$ această presiune coboară sub 100 daN/cm².

Pe măsură ce crește grosimea de perete a probelor turnate, valorile presiunii la care are loc penetrarea lichidului prin probele de 0,8 mm sînt tot mai scăzute față de cele la care are loc ruperea probelor (raportul p/p_{max} scade, tabelul 4.21).

Tabelul 4.21

ETANȘEITATEA FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR TURNATE ÎN PROBE CU DIFERITE GROSIMI DE PERETE [327, 328]

Grosimea de perete în stare turnată mm	Grosimea probelor supuse la încercări mm	Raportul dintre lungimea (L) și grosimea (g) separărilor de grafit L/g	Ferită %	Valoarea medie a presiunii de penetrație a lichidului, p daN/cm²	Valoarea medie a presiunii maxime la care are loc ruperea probelor, p_{max} daN/cm²	Raportul mediu al valorilor f/f_{max}	Săgeata maximă la deformare mm
20	0,8	2,4...3,06	35...50	254	250	0,96	0,4...1,5
80	0,8	27...29,6	88,..90	119	127	0,94	0,2
200	0,8	28,6...31	90...92	70	90	0,78	—

La un grad ridicat de compactitate, grafitul vermicular permite deformarea probelor înainte de rupere, înregistrîndu-se săgeți de deformare în limitele 0,4...1,5 mm. În mai multe cazuri s-au înregistrat ruperi ale probei sub influența presiunii, fără să aibă loc penetrarea lichidului.

Într-o altă serie de experimentări fontele au fost modificate cu 0,5...1,5% FeSiCaMgCe și turnate in probe cu diametrul 30...100 mm, ceea ce a permis obținerea unor proporții variabile de grafit lamelar, vermicular și nodular.

Grafitul vermicular asigură fontelor o etanșeitate mult sporită față de cea a fontelor cu grafit lamelar, chiar și în cazul alierii aces-

Scanned with OKEN Scanner

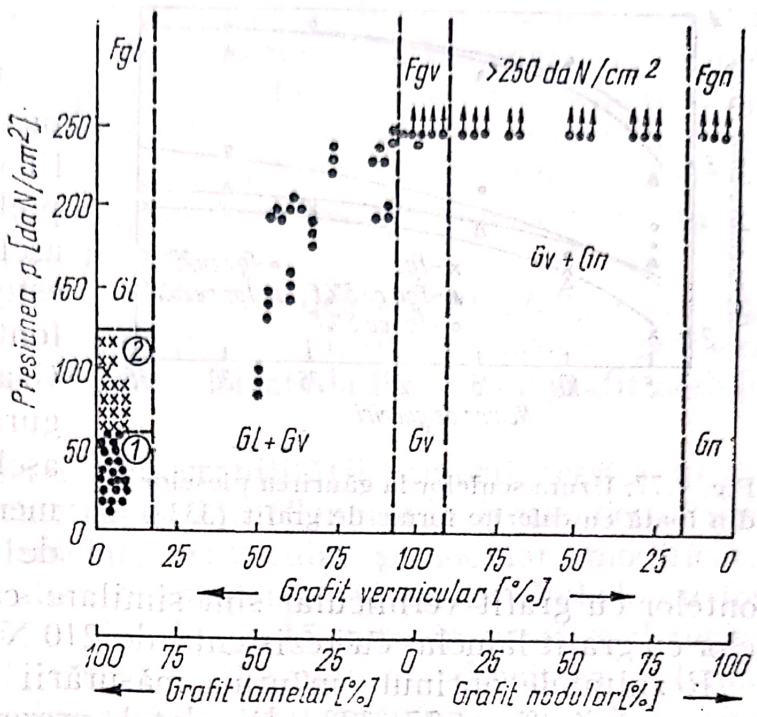


Fig. 4.76. Influența formei grafitului asupra presiunii la care are loc penetrația lichidului:

1 — fontă cu grafit lamelar nealiată; *2* — fontă cu grafit lamelar aliată Ni-Cr-Mo [327, 328].

tora (fig. 4.76). Au fost utilizate fonte cu grafit lamelar aliate cu 0,15...0,30%YSn83 (86,46%Sn, 10%Sb, 0,34%Pb) și cu Ni, Cr, Mo, (0,7% Cr, 0,5%Ni, 0,3%Mo).

Apariția grafitului lamelar in fontele cu grafit vermicular sub influența creșterii grosimii de perete, a unei modificări insuficiente sau a pierderii în timp a efectului modificator determină micșorarea etanșeității.

La conținuturi ale grafitului vermicular sub 50%, etanșeitatea se apropie de cea a fontelor cu grafit lamelar.

Dependența dintre presiunea de penetrație a lichidului (p)și proporția de grafit vermicular (Gv) poate fi scrisă sub forma:

$$p = 79{,}3 + 1{,}85.Gv \quad [daN/cm^2], \qquad (4.22)$$
$$r(p - Gv) = +0{,}619.$$

La fontele cu grafit vermicular (peste 95% Gv), raportul L/g) care variază în limitele 2...10, influențează în mare măsură valoa, rea presiunii de penetrație a lichidului (p), conform relațiilor:

$$P = 390{,}6 - 22{,}7.L/g \quad [daN/cm^2] \qquad (4.23)$$
$$r(p - L/g) = -0{,}945$$

Asocierea grafitului vermicular cu cel nodular determină obținerea unor valori ridicate pentru etanșeitate, presiunea la care are loc penetrația lichidului depășind 250 daN/cm².

Din punctul de vedere al etanșeității, fontele cu grafit vermicular se apropie în mare măsură de cele cu grafit nodular, la care se obțin valorile maxime.

Scanned with OKEN Scanner

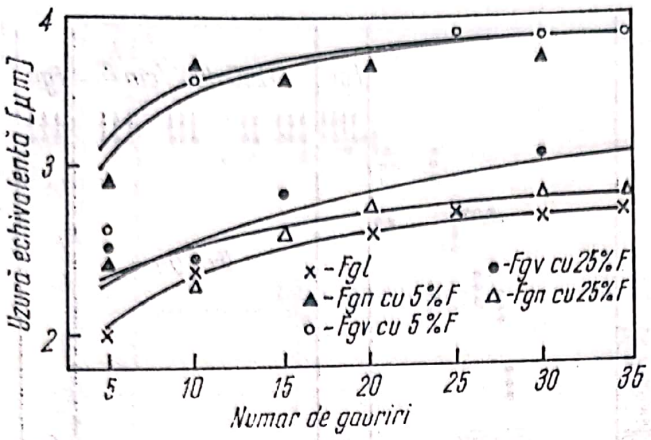


Fig. 4.77. Uzura sculelor la găurirea pieselor din fontă cu diferite forme de grafit [333].

Practica producerii pieselor din fontă cu grafit vermicular a arătat că prelucrabilitatea, prin așchiere, a acestor fonte este superioară față de fontele cu grafit nodular. Grafitul vermicular asigură o segmentare a așchiilor. Forma și dimensiunile unghiurilor de tăiere la prelucrarea fontelor cu grafit vermicular sînt similare ca la prelucrarea fontelor cu grafit lamelar cu rezistența de 210 N/mm² (Fc 200) [268].

Rezultatele obținute în urma măsurării uzurii la găurire sînt prezentate în fig. 4.77 [333]. Din datele prezentate rezultă că prelucrabilitatea Fgv este practic similară celei înregistrate la Fgn, uzura sculelor fiind mai mare decît în cazul găuririi pieselor din Fgl. Determinările au fost efectuate prin realizarea unor orificii ∅8 × ×16 mm, la o viteză de rotație de 78,0 rot/min și un avans de 72 mm/min.

Mai multe lucrări precizează că fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate printr-o bună prelucrabilitate, în raport cu celelalte fonte de turnătorie [122, 123, 218, 300, 434].

Dependența între prelucrabilitatea relativă și duritatea fontelor este prezentată în fig. 4.78 [216]. Prelucrabilitatea relativă a fost

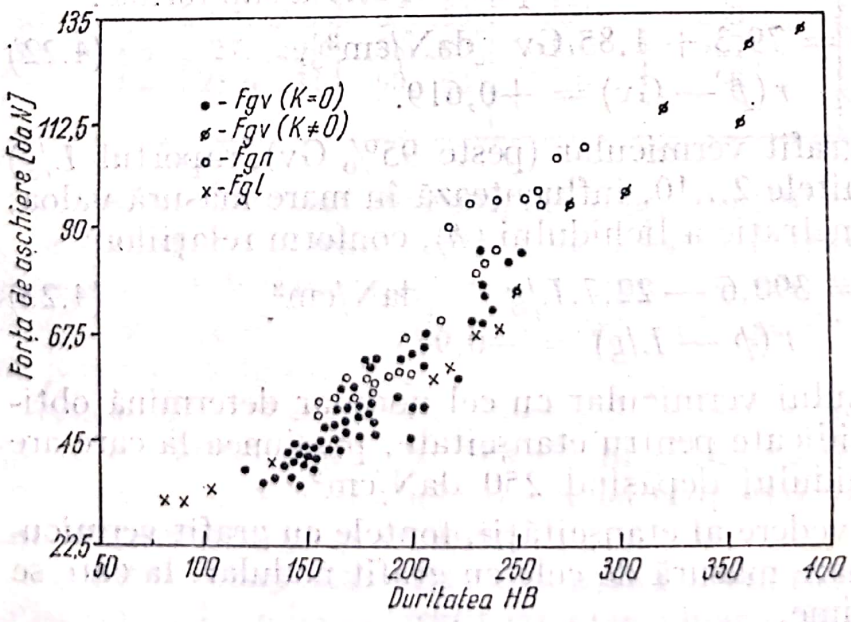


Fig. 4.78. Influența durității și a tipului grafitului asupra forței de așchiere [216].

determinată prin măsurarea forței de așchiere de la 6 mm la 0,13 mm, la o viteză de rotație de 1160 rot/min. Inversul acestei forțe este considerată ca fiind prelucrabilitatea. Forța de așchiere creste odată cu mărirea durității iar fontele cu grafit vermicular ocupă o poziție intermediară între celelalte tipuri de fonte. Se remarcă faptul că prelucrabilitatea depinde în mai mare măsură de duritatea fontei decît de tipul grafitului.

În cazul unor fonte cu grafit vermicular (30...70% Gv), obținute la conținuturi scăzute de magneziu, se apreciază că prelucrabilitatea este similară celei înregistrate la fontele cu grafit nodular în stare turnată [141].

În vederea aprecierii prelucrabilității, autorii acestei lucrări au turnat probe cu diametrul de 25...60 mm și înălțimea de 100 mm, din fonte cu grafit lamelar, vermicular și nodular, modificarea avînd loc cu modificatori cu magneziu și ceriu. Probele cu fost prelucrate prin așchiere pînă la ∅ 15 mm, în următorul regim: avans — 0,25 mm/rot, viteza — 100 m/min; adîncimea — 1 mm. Prelucrabilitatea este ilustrată prin valoarea forței de așchiere (F_z), lungimea maximă de așchiere pînă la uzarea totală a cuțitului (L) și rugozitatea suprafețelor prelucrate (R_a).

Variația tipului și a cantității de modificator, precum și a grosimii de perete, ca și aplicarea unor tratamente termice de recoacere grafitizantă și normalizare au asigurat obținerea unor structuri variabile din punctul de vedere al grafitului și masei metalice de bază.

Creșterea proporției de perlită determină mărirea forței de așchiere și micșorarea duratei de utilizare a cuțitului (fig. 4.79).

În condițiile date de experimentare, fontele cu grafit lamelar prezintă o prelucrabilitate superioară celor cu grafit nodular, în timp ce fontele cu grafit vermicular au o comportare intermediară, din punctul de vedere al forței de așchiere și a gradului de uzare a cuțitului.

Mărirea proporției de grafit vermicular, în dauna celui nodular, determină îmbunătățirea prelucrabilității fontelor (fig. 4.80).

În ce privește rugozitatea suprafețelor prelucrate, aceasta este mărită odată cu creșterea cantității de grafit vermicular (fig. 4.80 *b*). Fontele cu grafit vermicular prezintă o rugozitate, R_a, la valori de peste 5,0 μm, în timp ce pentru fontele cu grafit nodular se obțin valori mai mici. Masa metalică de bază influențează în mică măsură rugozitatea fontelor cu grafit vermicular și nodular, o dependență mai accentuată înregistrîndu-se la cele cu grafit lamelar, care prezintă cea mai mare rugozitate.

Scanned with OKEN Scanner

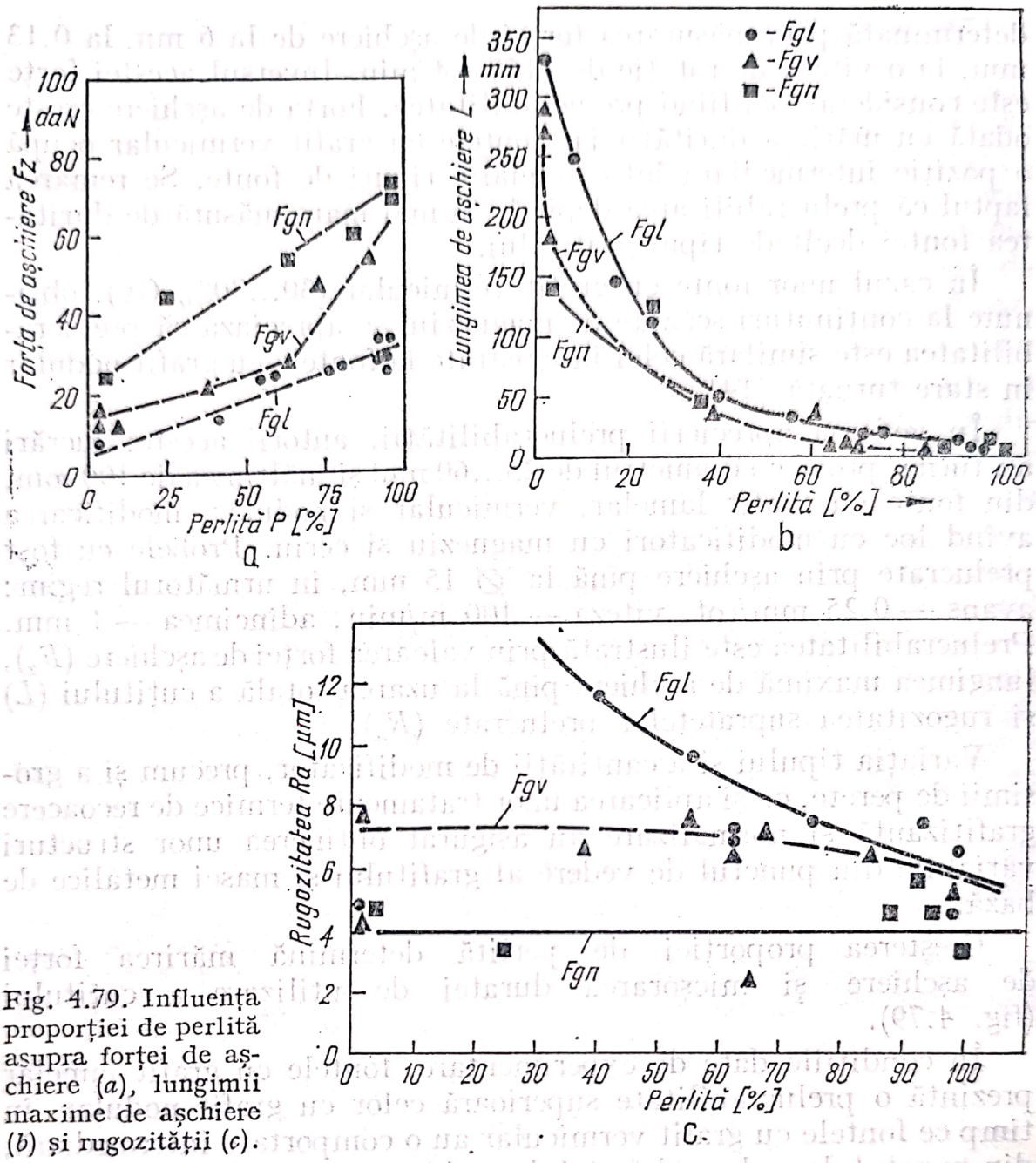


Fig. 4.79. Influența proporției de perlită asupra forței de așchiere (*a*), lungimii maxime de așchiere (*b*) și rugozității (*c*).

La o masă metalică feritică, diferențierile în ceea ce privește rugozitatea sînt mult mai accentuate, între fontele cu diferite forme de grafit, decît în cazul unei structuri preponderent perlitice. Fontele cu grafit vermicular ocupă o poziție intermediară și din acest punct de vedere.

Pe ansamblu, se poate aprecia că *prelucrabilitatea fontelor cu grafit vermicular* (cu structură preponderent feritică) *este superioară celei* înregistrate la fontele cu *grafit nodular*, fiind de același ordin de mărime ca cea constatată la fontele cenușii cu 50...70% P, respectiv marca Fc 200.

Scanned with OKEN Scanner

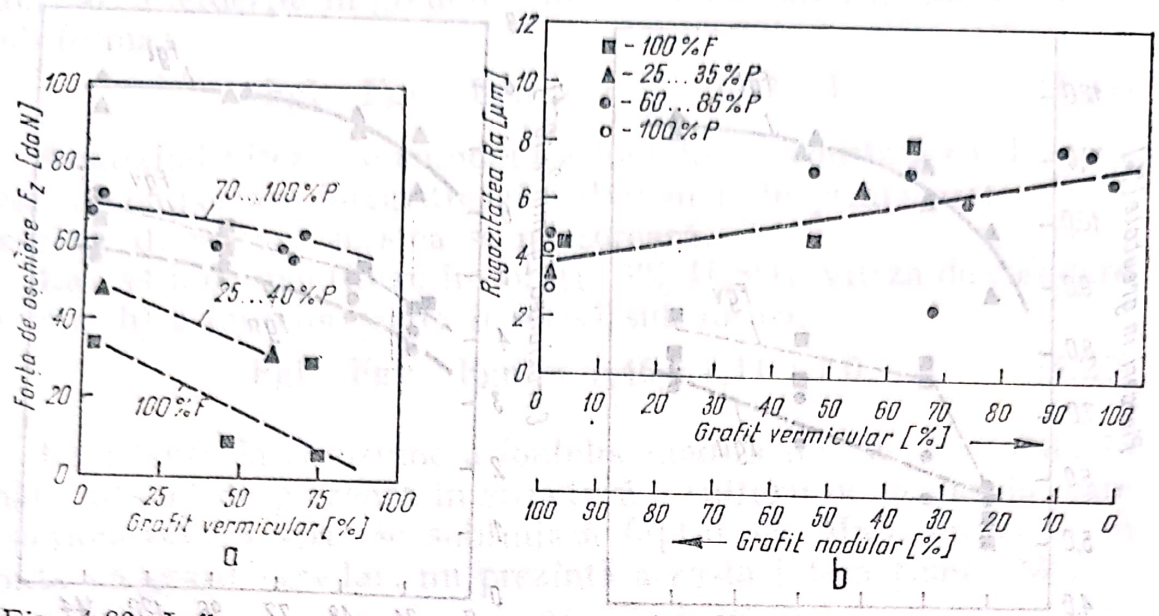


Fig. 4.80. Influența grafitului vermicular asupra forței de așchiere (*a*) și rugozității (*b*).

4.3.6. Rezistența la coroziune

Determinările efectuate în acid sulfuric 5% au arătat că fontele cu grafit nodular prezintă o rezistență de 3—4 ori mai mare decît a celor cu grafit lamelar, în timp ce fontele cu grafit vermicular ocupă o poziție intermediară [380].

Rezistența la coroziune (5% H_2SO_4) a fontelor cu grafit vermicular este superioară față de cea a fontelor cu grafit lamelar (tabelul 4.22). Fontele perlitice au o rezistență la coroziune mai mare decît cele feritice [172].

Urmărind comportarea la coroziune a fontelor cu grafit nodular și a celor maleabile, la un conținut similar de siliciu (circa 2%), se constată că comportarea la coroziune este practic identică [87].

Comportarea la coroziune a fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular, cu compoziția chimică de bază 3,47%C, 1,97% Si, 0,43% Mn, 0,09%P, 0,028%S este, după datele autorilor acestei lucrări cea prezentată în fig. 4.81. Grafitul nodular a fost obținut

Tabelul 4.22

VITEZA DE CORODARE A FONTELOR CU DIFERITE FORME DE GRAFIT [172]

Fonta	Masa metalică	Viteza de corodare, în g/m².h		
		20°C	50°C	90°C
Fgl	Ferită	280	687	1280
	Perlită	262	690	980
Fgv	Ferită	142	563	1037
	Perlită	139	478	920
Fgn	Ferită	123	534	923
	Perlită	99	460	842

Scanned with OKEN Scanner

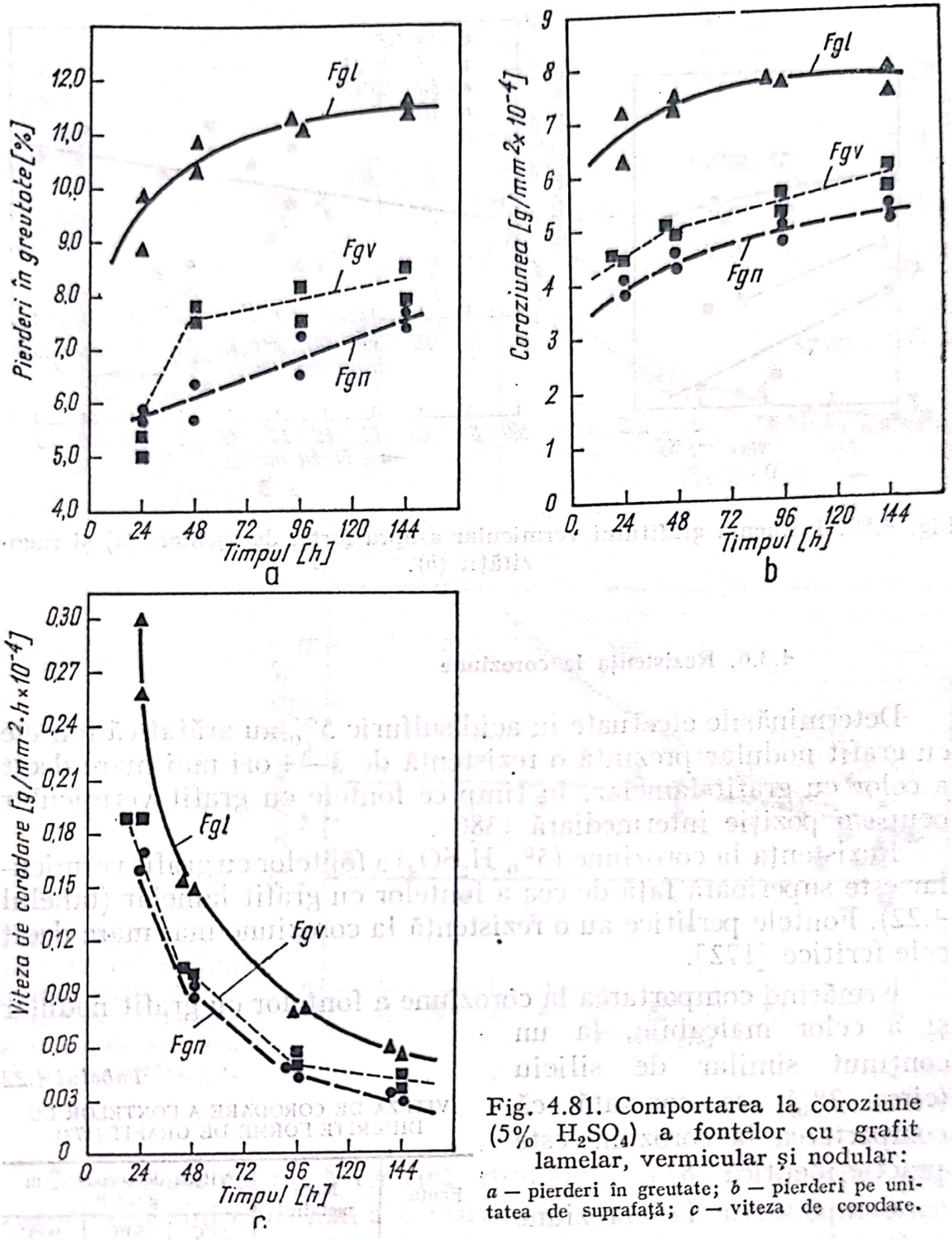


Fig. 4.81. Comportarea la coroziune (5% H_2SO_4) a fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular:
a — pierderi în greutate; *b* — pierderi pe unitatea de suprafață; *c* — viteza de corodare.

prin modificarea cu magneziu metalic, iar cel vermicular în urma modificării cu ceriu, astfel că compoziția de bază (în special siliciul) a rămas constantă. Probele în stare prelucrată, cu greutatea inițială cuprinsă în limitele 21,05...22,74 g, au fost menținute 24...144 h în soluție 5% H_2SO_4. Fontele cu grafit vermicular au o comportare la coroziune apropiată de cea a fontelor cu grafit nodular, mai bună însă decît cea înregistrată la fontele cu grafit

Scanned with OKEN Scanner

lamelar. Pierderile în greutate, în urma coroziunii, pot fi scrise sub forma:

$$Fgl : Fgv : Fgn = 1{,}55 : 1{,}12 : 1. \qquad (4.24)$$

Analizînd viteza de corodare a fontelor se constată că diferențele în comportare înregistrează valori mari în prima parte a procesului, după care acestea se micșorează.

La 144 h de menținere în soluție 5% H_2SO_4, viteza de corodare ($g/mm^2.h$) a fontelor poate fi scrisă sub forma:

$$Fgl : Fgv : Fgn = 1{,}46 : 1{,}11 : 1{,}0. \qquad (4.25)$$

Rezistența la coroziune a fontelor modificate este micșorată în mare măsură de prezența în structură a sulfurii de magneziu, care reacționează cu apa; se subliniază faptul că MnS, prezentă în fonta cu grafit lamelar, nu prezintă această interacțiune [28].

4.3.7. Sudabilitatea

S-a stabilit o tehnologie de sudare a fontei cu grafit vermicular, care a permis remanierea, în bune condiții, a carcaselor turnate din această fontă [11].

Sudarea la cald, în mediu gazos, cu electrozi din fontă cu grafit vermicular asigură obținerea unei structuri uniforme, din punctul de vedere al grafitului și masei metalice.

Electrozii pentru sudură (6 ×10 ×12 mm, L = 500 mm) au fost obținuți din fontă modificată cu Siitmiș-1 (30% PR, 52%Si, 7% Ca, 7%Al, Fe-rest) și postmodificată cu FeSi75 (1,0%Si), turnată în forme de grafit.

Se recomandă ca electrozii să nu conțină pori și arsuri, iar structura să constea din peste 60% ledeburită. Compoziția optimă a fontei pentru electrozi: 3,5...3,8%C, 2,5...2,8%Si, 0,8...1,0%Mn, 0,6...0,15%PR_{rem}.

În topitura din zona de sudare se obține grafit vermicular (max. 20% Gn), dacă fonta din care sînt confecționați electrozii conține 0,06...0,08% PR, în timp ce grafitul nodular apare la 0,12...0,15%PR (în electrozi).

Suprafața supusă sudării este încălzită la 650...700°C, flacăra fiind reglată în așa fel încît produsele arderii să aibă un caracter reducător (exces de acetilenă).

Pentru a evita arderea elementelor de aliere în timpul sudării se recurge la o topire redusă a materialului de bază, baia lichidă avînd o suprafață restrînsă (electrozii cu capătul în topitură).

Agitarea electrozilor permite o omogenizare corespunzătoare a topiturii. În procesul de sudare, periodic, la capătul electrozilor

Scanned with OKEN Scanner

se adaugă un flux, format din 50% carbonat de sodiu, 42% acid boric, 6% sulfat de amoniu, 2% fluorură de magneziu.

În vederea micșorării tendinței de formare a cementitei libere se realizează o răcire cu o viteză scăzută a topiturii, prin menținerea arzătorului la o distanță de circa 100 mm de piesă, timp de 2...3 min.

După sudare, piesele sînt supuse unui tratament termic, cu scopul de a elimina complet cementita liberă și a constituenților de călire, pentru a micșora valoarea tensiunilor interne și în vederea realizării proprietăților mecanice impuse. Acest tratament constă din: încălzire cu viteza de 100°C/h pînă la 600°C și apoi cu 50°C/h pînă la 910 ± 10°C; la această temperatură, piesele sînt menținute timp de 3...5 h, funcție de grosimea de perete. Răcirea are loc în cuptor, cu o viteză sub 100°C/h și apoi în aer.

Caracteristicile structurale și cele mecanice ale materialului de bază și a celui sudat, după tratamentul termic, sînt prezentate în tabelul 4.23 [11].

Tabelul 4.23

CARACTERISTICILE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR SUDATE [11]

Locul de prelevare a probelor	Compoziția chimică, %						Grafit	Caracteristici mecanice		
	C	Si	Mn	P	S	PR		R_m N/mm²	A %	HB
Fonta de bază	3,58	2,60	0,94	0,051	0,007	0,09	Gv	397	4,0	170
Sudură (electrod cu 0,08% PR)	3,67	2,44	1,00	0,032	0,008	0,08	Gv	431	4.5	176
Sudură (electrod cu 0,14% PR)	3,64	2,53	0,96	0,043	0,006	0,12	Gn	470	8,5	182

Se constată că proprietățile mecanice ale fontei din zona de sudură sînt superioare celor realizate de către fonta de bază, datorită obținerii unor separări de grafit vermicular de dimensiuni reduse și finisării masei metalice.

Porțiunile sudate sînt caracterizate de caracteristici mecanice ridicate, respectiv $R_m \geqslant 372$ N/mm² și $A > 1{,}5\%$.

Măsurarea tensiunilor interne, din porțiunile sudate după tratamentul termic a arătat că valoarea acestora (1960...23.030 KPa) este la nivelul tensiunilor remanente din piesele mari din fontă.

Se apreciază că posibilitatea de reglare a componenței flacării, a duratei de încălzire și a vitezei de răcire constituie condiții de bază pentru obținerea unei suduri corespunzătoare.

Scanned with OKEN Scanner

Analizînd comportarea la sudare a fontelor, Andreev, V.V. și colaboratorii săi consideră că fontele cu grafit vermicular au o sensibilitate mai mică la formarea structurii de călire în zona pe sudare, avînd o sudabilitate superioară fontelor cu grafit nodular [11].

4.4. Proprietăți de turnare

4.4.1. Contracția liniară

Contracția fontei în stare lichidă (ε_l) crește odată cu mărirea conținutului de carbon, depinzînd în același timp și de temperatura de turnare (T_t).

Fontele modificate au practic aceeași contracție în stare lichidă ca și fontele nemodificate, de aceeași compoziție chimică.

Contracția fontei la solidificare este un proces deosebit de complex, avînd în vedere faptul că în acest timp are loc o schimbare a stării de agregare. Pe de altă parte, tot în acest timp are loc un proces de îndepărtare a gazelor, de apariție a grafitului etc.

La fontele cu grafit în structură, contracția la solidificare depinde și de procesul de grafitizare, separarea grafitului ducînd la mărirea volumului fontei. Se consideră că separarea din soluție a unui procent de carbon sub formă de grafit determină mărirea volumului fontei cu circa 2%.

Cu cît cantitatea de grafit eutectic este mai mare, cu atît creșterea de volum va fi mai accentuată iar contracția la solidificare (ε_s) mai mică.

Valoarea contracției la solidificare (ε_s), funcție de conținutul de carbon al fontei (C) și de cantitatea de grafit (C_{gr}) ce apare la solidificare este:

$$\varepsilon_s = 6{,}9 - 0{,}9\%\ C - 2 \cdot C_{gr} \qquad [\%].$$

Urmărindu-se curbele de contracție liniară a mai multor aliaje feroase se constată că, din momentul începerii solidificării și pînă la temperatura ambiantă, se înregistrează atît zone de dilatare cît și de contracție.

Un element specific curbei de contracție liniară în cazul aliajelor feroase cu grafit în structură îl constituie *dilatarea inițială*.

Deși apariția dilatării inițiale a fost semnalată de mult timp există încă o mare diversitate de păreri în ceea ce privește explicarea acestui fenomen (tabelul 4.24) [304].

Tabelul 4.24

IPOTEZE PRIVIND CAUZELE DILATĂRII INIȚIALE LA FONTE [304, 319]

Nr. crt.	Cauza apariției dilatării inițiale	Argumente aduse pentru susținerea ipotezelor	Bibliografie
1	2	3	4
1	Separarea gazelor la solidificare	Creșterea conținutului de gaze din fontă determină o mărire de volum și ca atare este înregistrată o dilatare pe curba de contracție	[283]
		La turnare conținutul de gaze crește cu circa 48...50% datorită interacțiunii metal-formă (36...38% H_2, 60...62% O_2, 65...67% N_2)	[427]
		Dilatarea inițială este înregistrată și la aliajele neferoase, fiind pusă pe seama gazelor	[56]
2	Solidificarea în volum a fontelor	Apariția simultană, în întreg volumul piesei, a celulelor eutectice determină o presiune asupra formei	[36, 138]
		La Fgn numărul de celule eutectice este de 150...200 ori mai mare decît la Fc, ceea ce ar explica creșterea dilatării	[86]
3	Solidificarea în volum, cu formarea unei cruste în contact cu forma	După formarea crustei în piesă se dezvoltă o presiune interioară datorită solidificării eutectice, iar în urma cedării crustei plastice are loc o mărire de volum	[100]
4	Solidificarea în volum a 70% lichid, cu formarea unui schelet solid	Difuzia carbonului din lichid în celulele eutectice formate determină, în cazul Fgn, măriri de volum	[266]
		La fontele cu grad de saturație în carbon ridicat ($S_c > 0,95$) acest lucru este posibil și la fonta cu grafit lamelar	[110]
5	Apariția carburilor la solidificare	Volumul specific al fontei (Fe-C-Si) este mărit odată cu apariția cementitei: $V = 0,12698 + 0,003142 \cdot C$ (grafit) $+ 0,000478 \cdot C$ (carburi) $+ 0,001089 \cdot Si$	[162]
		În cazul unor oțeluri înalt aliate cu crom au fost înregistrate valori ale dilatării inițiale de max. 0,15%, la separarea unor cantități mari de carburi	[304]

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.24 (continuare)

1	2	3	4
6	Presiunea capilară a fontei lichide	La fontele cenușii hipoeutectice (S_c = =0,9) presiunea capilară a licvației inverse prin canale interdendritice poate determina o dilatare	[110]
7	Grafitizarea indirectă, prin descompunerea carburilor	La Fgn a fost pusă în evidență posibilitatea de descompunere a cementitei la solidificare	[358]
		Este posibilă formarea și descompunerea carburilor de magneziu, cu formarea grafitului	[87]
		Segregația directă a Si și Ni și inversă a Cr a condus la descompunerea cementitei la fonta albă	[101]
		Dilatarea inițială este înregistrată la valori maxime la sfîrșitul perioadei de cristalizare eutectică și după terminarea acesteia	[428]

Urmărirea concomitentă a curbei contracției liniare și cea a răcirii fontei (fig. 4.82) scoate în evidență rolul de prim ordin al cristalizării eutectice în apariția dilatării inițiale.

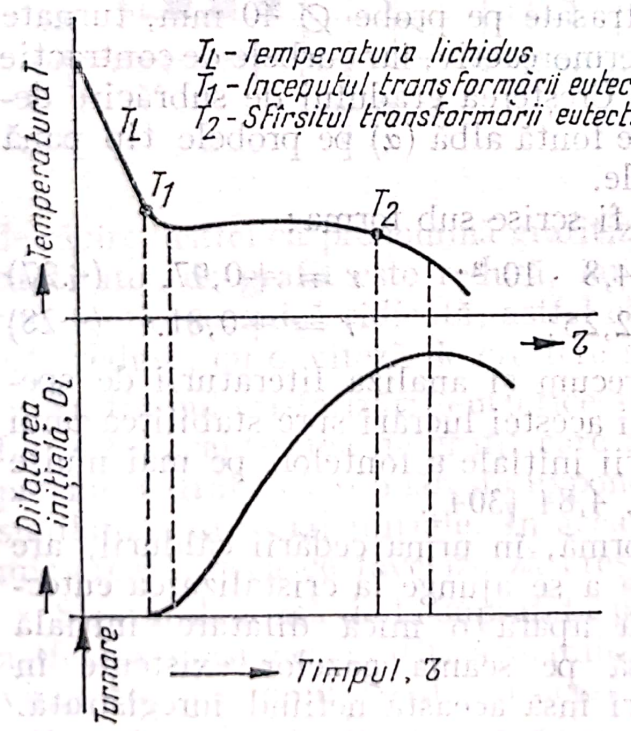


Fig. 4.82. Curbele de răcire și de variație a dilatării inițiale.

Se constată deci că dilatarea inițială începe practic odată cu inițierea transformării eutectice, valoarea maximă atingîndu-se la sfîrșitul acesteia. Marea majoritate a cercetătorilor sînt de acord că separarea grafitului la cristalizarea eutectică este principala cauză a dilatării inițiale, presiunea creată de acest fenomen cunoscînd și numele de „presiune grafitică".

Cercetările efectuate în ultimii ani scot tot mai mult în evidență

Scanned with OKEN Scanner

legătura între dilatarea inițială și procesul de grafitizare indirectă a fontelor.

Experimentările efectuate de către autori au arătat că mărirea vitezei de răcire și acțiunea unor elemente antigrafitizante, care favorizează grafitizarea indirectă a fontelor conduc la creșterea valorii dilatării inițiale, indiferent de tipul grafitului [304, 319].

Inocularea cu B, B+Mg, Ni+Cr+N, determină mărirea zonei de fontă albă (α) pe proba tip pană, deci deplasarea fontelor spre o solidificare în sistemul metastabil.

În toate cazurile în care probele supuse contracției nu au prezentat după solidificare cementită liberă în structură, dilatarea inițială a avut valori ridicate, aceasta putînd fi explicată prin procesul de grafitizare indirectă.

În cazul în care, însă, viteza de răcire este prea mare sau acțiunea antigrafitizantă a elementelor din compoziția fontei prea puternică, carburile care apar la cristalizarea eutectică devin stabile, fonta solidificînd cu cementită liberă în structură și cu o dilatare inițială mai mică (fig. 4.83) [304].

Inocularea unor fonte hipereutectice ($S_c = 1{,}011...1{,}034$) cu cantități variabile de magneziu (0,0...0,05%) determină o creștere a gradului de subrăcire. Gradul de subrăcire la cristalizarea fontei (ΔT) a fost calculat cu relațiile:

$$\Delta T = T'_{c\,(teoretic)} - T'_{c\,(real)}, \qquad (4.26)$$

$$T'_{c\,(teoretic)} = 1153 + 7{,}5 \cdot \mathrm{Si} - 30 \cdot \mathrm{P}.$$

Curbele de răcire au fost trasate pe probe $\varnothing$ 40 mm, turnate în forme din amestec cu liant termoreactiv, iar curbele de contracție pe probe 20 × 20 × 200 mm. Creșterea gradului de subrăcire determină mărirea atît a zonei de fontă albă (α) pe probele tip pană cît și valoarea dilatării inițiale.

Dependențele stabilite pot fi scrise sub forma:

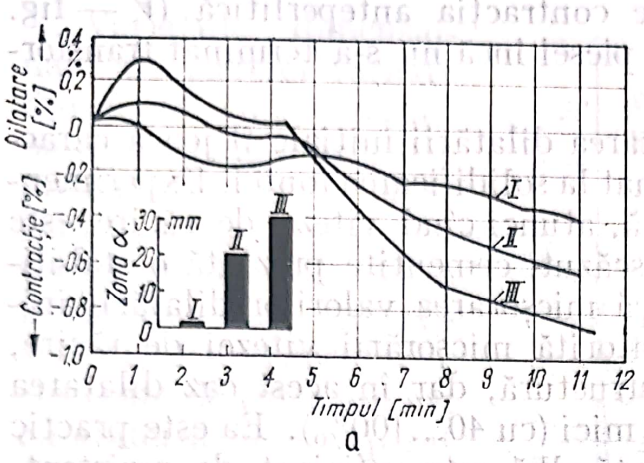
$$D_i = 3{,}76 \cdot 10^{-3}\, T - 4{,}8 \cdot 10^{-2}; \qquad r = +0{,}97, \qquad (4.27)$$

$$\alpha = 8{,}26 \cdot 10^{-3}\, T - 2{,}25; \qquad r = +0{,}81. \qquad (4.28)$$

Experimentările proprii precum și analiza literaturii de specialitate i-au condus pe autorii acestei lucrări spre stabilirea unui model de desfășurare a dilatării inițiale a fontelor, pe mai multe etape, așa cum rezultă din fig. 4.84 [304].

După turnarea fontei în formă, în urma cedării căldurii, are loc răcirea acesteia. Înainte de a se ajunge la cristalizarea eutectică (I — fig. 4.84), poate să apară o mică dilatare inițială ($D_{i0} \geqslant 0$), care poate fi pusă pe seama gazelor existente în topitură, de cele mai multe ori însă aceasta nefiind înregistrată.

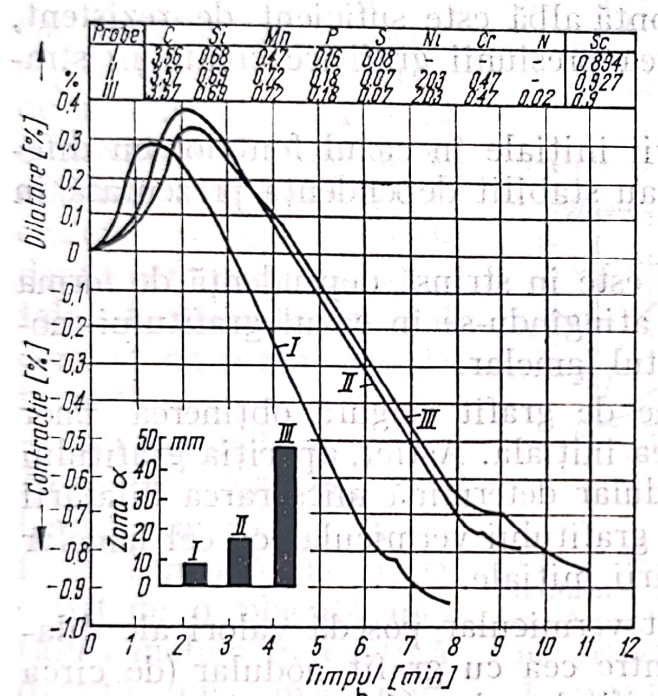
În stratul de fontă, de la contactul cu forma, în curs de solidificare, începe cristalizarea eutectică (II) cu o viteză mai mare



a

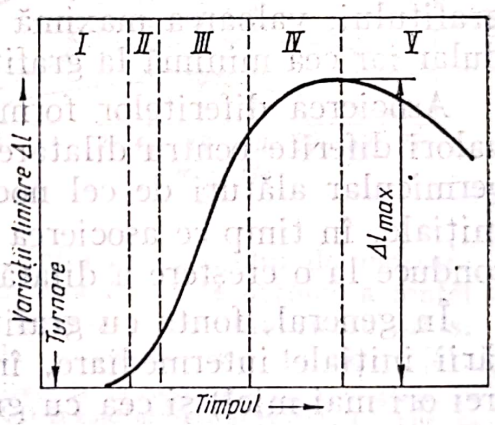
Fig. 4.83. Curbele de contracție liniară și mărimea zonei de fontă albă pe probele tip pană (α) [304]:

a — Fonte cu $Sc = 0{,}964-0{,}995$; *I* — fonta inițială; *II* — 0,034% B; *III* — 0,033% B + 0,015% Mg; *b* — Fonte aliate cu Ni, Cr, N.



b

Fig. 4.84. Etapele desfășurării dilatării inițiale în cazul fontelor [304].



de răcire, astfel că predomină grafitizarea indirectă. În prima fază, cantitatea de grafit este redusă, iar forma de turnare are încă o rezistență mecanică ridicată, astfel că dilatarea inițială care apare este redusă, cu o viteză de creștere scăzută.

În timpul cristalizării eutectice și spre sfîrșitul acesteia (*III*— fig. 4.84), cantitatea de grafit care apare crește rapid și ca atare presiunea grafitică se mărește exponențial, determinînd o creștere similară a dilatării inițiale. În această etapă, rezistența formei se micșorează, ceea ce favorizează creșterea dilatării inițiale.

Stratul de fontă de la suprafața piesei devine tot mai rezistent, astfel că presiunea grafitică manifestată în interiorul probei învinge tot mai greu rezistența acestuia, din care cauză viteza de creștere a dilatării inițiale se micșorează (*IV* — fig. 5.84). La un moment dat, dilatarea nu se mai manifestă, atingîndu-se valoarea $D_{i\,max}$.

Scanned with OKEN Scanner

Din acest moment începe contracția anteperlitică (*V* — fig. 4.84), chiar dacă în interiorul piesei încă nu s-a terminat transformarea eutectică.

Un rol important în realizarea dilatării inițiale îl joacă caracteristicile primului strat format la solidificarea fontei. Experimentul a pus în evidență faptul că, atunci cînd viteza de răcire este mare și conținutul de siliciu scăzut, cementita prezintă o stabilitate mai mare, ceea ce explică micșorarea valorilor dilatării inițiale. În interiorul piesei, datorită micșorării vitezei de răcire, rezultă o fontă cu grafit în structură, dar în acest caz dilatarea inițială a prezentat valori mai mici (cu 40...100%). Ea este practic nulă, atunci cînd stratul de fontă albă este suficient de rezistent, ca să nu permită manifestarea presiunii grafitice create în straturile interioare ale piesei.

Urmărind valorile dilatării inițiale în cazul fontelor cu diferite forme de grafit, autorii au stabilit dependența prezentată în fig. 4.85 [304].

Valoarea dilatării inițiale este în strînsă dependență de forma grafitului, valoarea maximă atingîndu-se în cazul grafitului nodular iar cea minimă la grafitul lamelar.

Asocierea diferitelor forme de grafit asigură obținerea unor valori diferite pentru dilatarea inițială. Astfel, apariția grafitului vermicular alături de cel nodular determină micșorarea dilatării inițiale, în timp ce asocierea grafitului vermicular cu cel lamelar conduce la o creștere a dilatării inițiale.

În general, fonta cu grafit vermicular posedă valori ale dilatării inițiale intermediare, între cea cu grafit nodular (de circa trei ori mai mici) și cea cu grafit lamelar (de circa două ori mai mari), deci este mai apropiată, din acest punct de vedere, de fonta cu grafit lamelar.

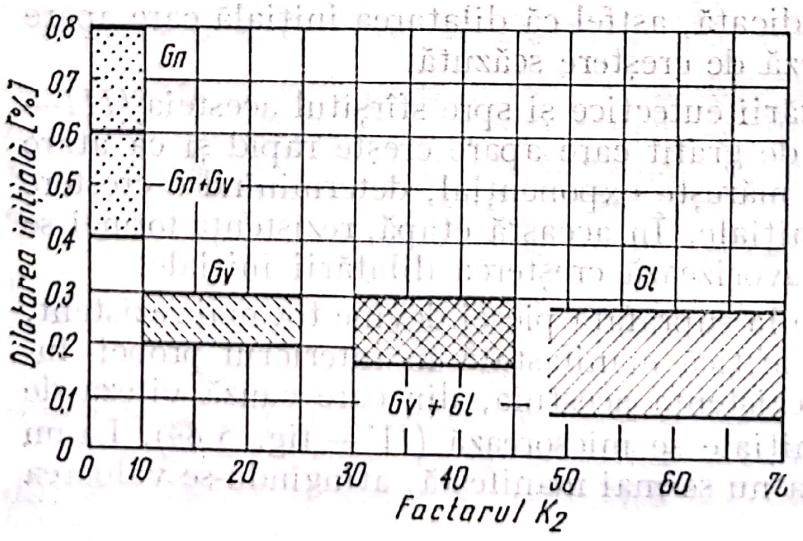


Fig. 4.85. Influența formei grafitului asupra valorilor dilatării inițiale $\left(K_2 = \frac{4{,}4\ \text{Ti} + 1{,}6\ \text{Al}}{\text{Mg}}\right)$ [304, 307].

Scanned with OKEN Scanner

Variațiile dimensionale ale pieselor turnate din fontă sînt determinate nu numai de către presiunea grafitică, apărută la solidificarea fontei ci și de către forța mecanică, la turnarea acesteia. Experimentările efectuate de către autori, cu ajutorul unui aparat care funcționează pe principiul transmiterii forței de acționare a fontei la o membrană elastică și măsurarea deformării acesteia au scos în evidență deformări ale peretelui formei, la primul contact cu fonta lichidă turnată.

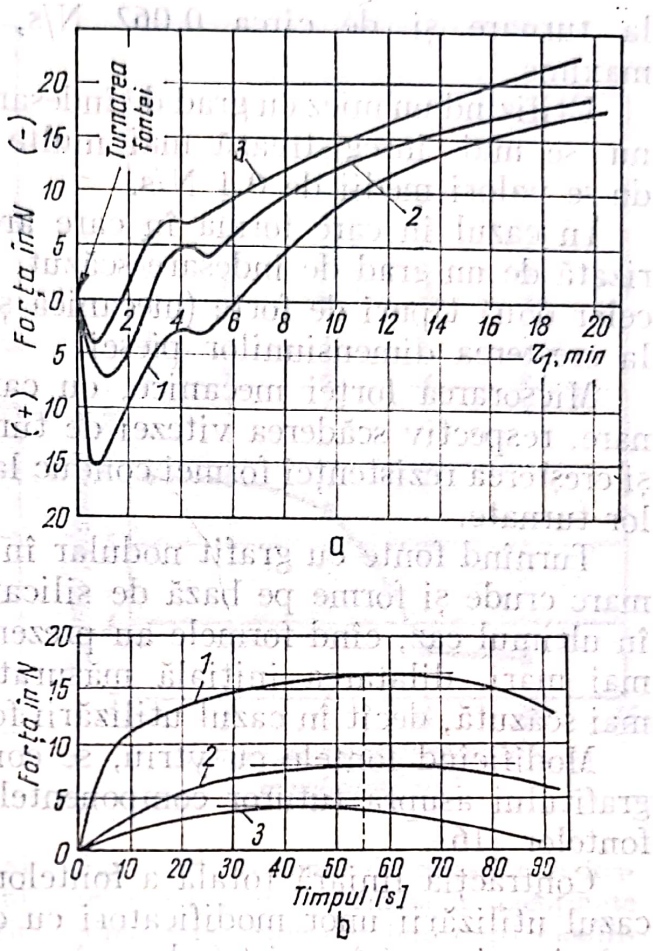


Fig. 4.86. Influența gradului de îndesare a formei asupra forței de acțiune a fontei pe întreg intervalul de solidificare (*a*) și în primele momente ale turnării (*b*):
1 — probă liberă la un capăt; *2* — miez cu gradul de îndesare 50 UD la capătul liber al probei; *3* — miez cu gradul de îndesare 85 UD.

Au fost utilizate probe 19 × 20 × 200 mm, libere la un capăt, proba fiind limitată la acest capăt de o plăcuță metalică mobilă în legătură directă cu membrana elastică. În cazul fontei cenușii din marca Fc200, la scurt timp de la începerea turnării (5 s), se înregistrează peste 60% din deformația membranei, respectiv o forță de apăsare de peste 10 N. Deformația maximă a membranei elastice se realizează după un timp mai îndelungat (55 s), așa cum rezultă din fig. 4.86.

Pe ansamblu s-a constatat că forța totală de acționare a fontei asupra formei este determinată în proporție de 40...60% de acțiunea mecanică din timpul turnării și de 60...40% de presiunea grafitică din timpul solidificării.

În cazul în care la capătul liber al probei au fost introduse miezuri de amestec de formare, prin care trece tija de acționare asupra membranei elastice, pe curbele de variație ale forței au fost observate mai greu etape distincte. Astfel, la un miez cu gradul de îndesare 50 unități Dietert (UD), similar cu cel al formei, se realizează o creștere a forței de circa 0,25 N/s, în primele 20s de

la turnare și de circa 0,062 N/s, pînă la atingerea valorii maxime.

Utilizînd un miez cu grad de îndesare mai mare (85 UD), practic nu se mai înregistrează mai multe etape de variație, obținîndu-se valori medii de 0,1 N/s.

În cazul în care forma în care are loc turnarea este caracterizată de un grad de îndesare scăzut, poate să cedeze la acțiunea celor două tipuri de forțe (mecanică și grafitică), ducînd în final la creșterea dimensiunilor piesei.

Micșorarea forței mecanice, cu care acționează fonta la turnare, respectiv scăderea vitezei de turnare și a înălțimii, precum și creșterea rezistenței formei conduc la micșorarea dilatării, piesele turnate.

Turnînd fonte cu grafit nodular în forme din amestec de formare crude și forme pe bază de silicat de sodiu, s-a constatat că în ultimul caz, cînd formele au prezentat durități de circa 10 ori mai mari, dilatarea inițială măsurată a fost de circa două ori mai scăzută, decît în cazul utilizării formelor crude [259].

Modificînd fontele cu ytriu, se constată o influență a formei grafitului asupra tuturor componentelor curbelor de contracție a fontelor [16].

Contracția liniară totală a fontelor prezintă valori minime în cazul utilizării unor modificatori cu conținut de calciu și bariu, valori mai mari înregistrîndu-se în cazul în care modificatorii au o acțiune antigrafitizantă mai puternică [222].

4.4.2. Volumul de retasură

Ținînd seama atît de particularitățile procesului de grafitizare, cît și de apariția și desfășurarea dilatării inițiale, se poate aprecia că volumul de retasură poate fi micșorat dacă:

— grafitul apare în cea mai mare parte direct din lichid (grafitizarea directă);

— forma este rigidă și rezistă la expansiunea determinată de apariția grafitului în urma grafitizării indirecte.

Atît dilatarea inițială cît și volumul de retasură depind, în mod direct, de tipul grafitului și de condițiile de formare ale acestuia în fontă (fig. 4.87).

Trecerea de la fonta cu grafit nodular la cea cu grafit vermicular și lamelar determină o micșorare a volumului de retasură, această micșorare fiind determinată de scăderea valorii dilatării inițiale, respectiv a forței grafitice.

În cazul în care fontele cu grafit vermicular au fost menținute diferite perioade de timp de la modificare pînă la turnare, s-a

Scanned with OKEN Scanner

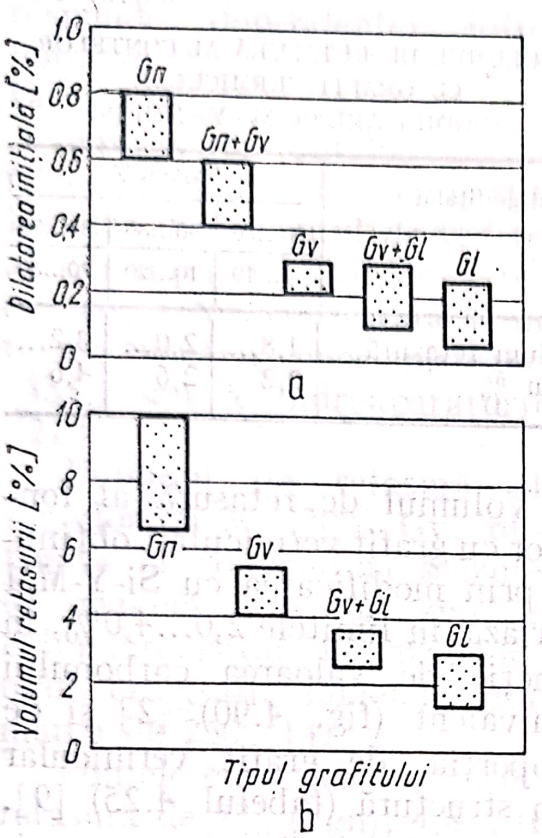


Fig. 4.87. Dilatarea inițială (*a*) și volumul de retasură (*b*) în cazul fontelor cu diferite forme de grafit [306, 307].

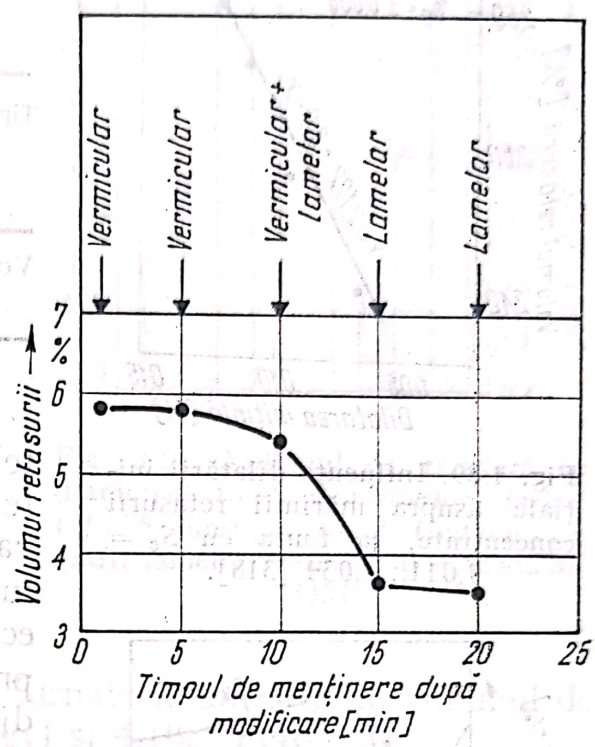


Fig. 4.88. Volumul de retasură al fontelor cu grafit vermicular menținute diferite perioade de timp după modificare (determinat pe probe ∅ 50 mm) [306, 307].

realizat o trecere de la grafitul vermicular spre cel lamelar, ceea ce a determinat o micșorare a volumului de retasură. Determinînd volumul de retasură direct pe probe de ∅ 50 mm, se obțin valorile prezente în fig. 4.88 [306, 307].

Apariția grafitului lamelar, în urma demodificării fontelor în perioada de menținere, conduce la micșorarea volumului de retasură. La același tip de fontă, mărirea dilatării inițiale determină o creștere a volumului de retasură. În cazul unor fonte hipereutectice, cu compoziția chimică: 3,55...3,57% C, 2,06...2,38% Si, 0,84...0,94% Mn, 0,13...0,14% P, 0,030...0,057% S, la un grad de saturație în carbon S_c = 1,011...1,034 a fost obținută dependența prezentată în fig. 4.89 [318].

Fontele cu grafit vermicualr sînt caracterizate printr-un volum de retasură mai scăzut decît cel la fontelor cu grafit nodular și foarte apropiat de cel al fontelor cu grafit lamelar. Din această cauză, trecerea de la fonta cu grafit lamelar, la cea cu grafit vermicular nu necesită măsuri speciale de maselotare, în timp ce la o trecere de la fonta cu grafit nodular la cea cu grafit vermicular se realizează o micșorare a maselotelor.

Scanned with OKEN Scanner

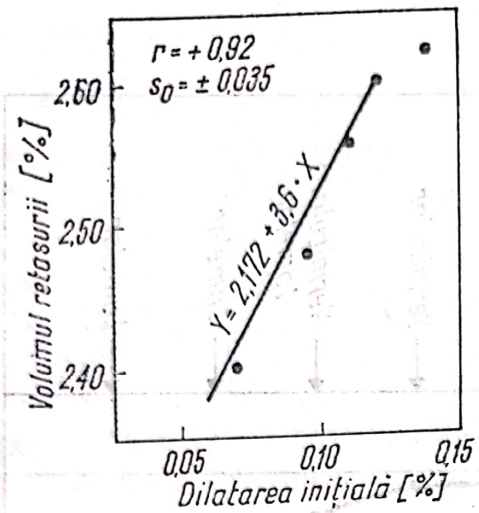


Fig. 4.89. Influența dilatării inițiale asupra mărimii retasurii concentrate, la fonta cu S_c = 1,011...1,034 [318].

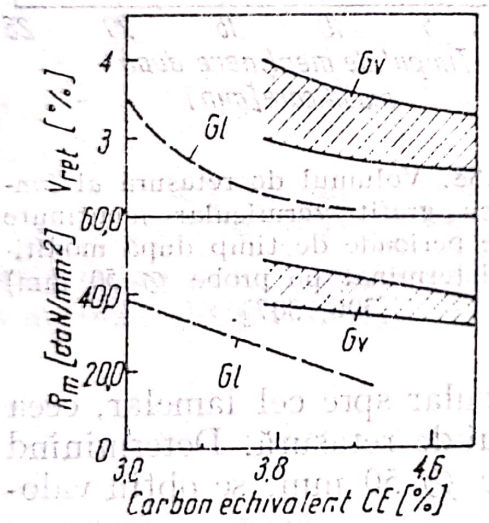


Fig. 4.90. Influența carbonului echivalent asupra rezistenței și a volumului de retasură a fontelor cu grafit lamelar și vermicular (modificare cu Si-Y-MM) [2].

Tabelul 4.25

VOLUMUL DE RETASURĂ AL FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR (MODIFICARE CU Si—Y—MM) [9]

Tipul grafitului	Gv/Gn, %		
	100...90	90...80	80...70
	0...10	10...20	20...30
Volum retasură, în %	1,8... 2,2	2,0... 2,6	3,2... 4,6

Volumul de retasură al fontelor cu grafit vermicular, obținute prin modificarea cu Si-Y-MM variază în limitele 2,0...4,0%, în funcție de valoarea carbonului echivalent (fig. 4.90) [2] și de proporția de grafit vermicular din structură (tabelul 4.25) [9].

Analizînd influența compoziției modificatorilor asupra măririi volumului de retasură în cazul fontelor cu grafit nodular, lucrarea [222] scoate în evidență faptul că cel mai mare volum de retasură se obține la modificarea cu Ni-Cu-Mg, Ni-Mg-PR și Y (cu acțiunea grafitizantă cea mai scăzută), în timp ce valori scăzute sînt obținute la conținuturi mai ridicate de calciu. Elementele din grupa pămînturilor rare, manifestînd o acțiune antigrafitizantă, măresc volumul de retasură.

Analiza tendinței de formare a retasurii, în cazul unor probe sferice cu ∅ 76 mm, a condus la rezultatele prezentate în fig. 4.91 [333].

Volumul golurilor de contracție apărute la suprafața probelor sferice precum și diametrul final al acestora scot în evidență poziția intermediară a fontelor cu grafit vermicular, precum și poziția lor mai apropiată de cea a fontelor cu grafit lamelar. Corelația între volumul de retasură și diametrul final al probelor co-

Scanned with OKEN Scanner

respunde dependenței între volumul de retasură și dilatarea inițială a fontelor.

Apropierea fontelor cu grafit vermicular de cele cu grafit lamelar din punctul de vedere al tendinței de formare a recasurii, a fost constatată și în tazul turnării unor pistoane [353] sau a hidroaparaturii [22].

Volumul de retasură al fontelor cu 30...70% Gv, obținute la conținuturi scăzute de magneziu, a fost similar celui înregistrat în cazul fontelor cu grafit lamelar, din marca Fc 250 [141].

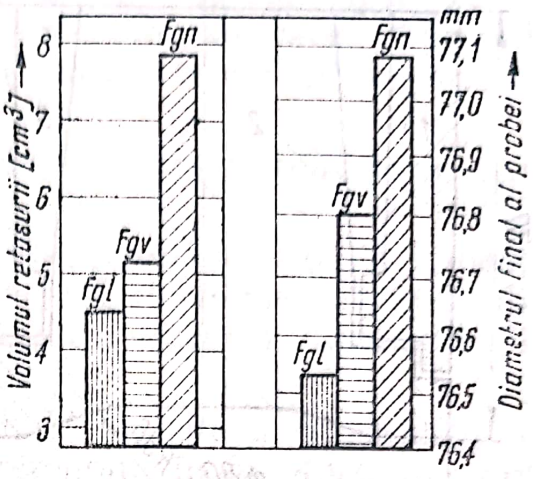


Fig. 4.91. Volumul de retasură și diametrul final al probelor sferice (∅ 76 mm) în cazul fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular [333].

Fontele eutectice (S_c= 1,0), turnate în amestec au volumul de retasură de 7% (Fgn), 4,8% (Fgv) și 4,1% (Fgl) [257].

4.4.3. Tendința de formare a crăpăturilor la cald

Pentru determinarea tendinței de formare a crăpăturilor la cald se utilizează proba prezentată în fig. 4.92 [113].

Tendința de formare a crăpăturilor la cald este exprimată prin relația:

$$T_c = \frac{l_{fis}}{l_p} \times 100 \quad [\%], \qquad (4.29)$$

în care: T_c este tendința de formare a crăpăturilor la cald, în %; l_{fis} — lungimea celei mai mari fisuri, în mm; l_p — perimetrul secțiunii longitudinale a probei, în mm.

Prelucrînd datele din lucrarea [113] în sensul stabilirii unei corelații între tendința de formare a crăpăturilor la cald și valoarea dilatării inițiale, autorii acestei lucrări au obținut rezultatele prezentate în fig. 4.93.

Creșterea valorii dilatării inițiale determină micșorarea contracției la începutul solidificării și prin aceasta și sensibilitatea la formarea crăpăturilor la temperaturi ridicate (la cald).

Corelația stabilită este însă destul de slabă (r = 0,355), dar nu întîmplătoare, nivelul de încredere (P) fiind doar cu puțin mai mic de 0,9.

Scanned with OKEN Scanner

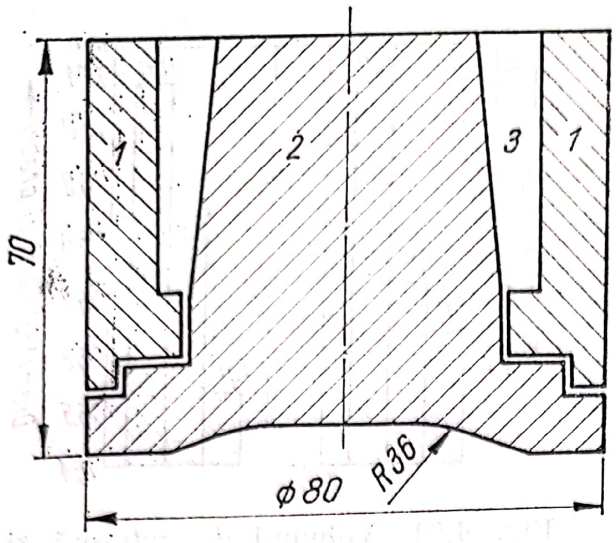


Fig. 4.92. Proba pentru determinarea tendinței de formare a crăpăturilor la cald [113]:
1 — formă metalică; *2* — miez metalic; *3* — proba turnată.

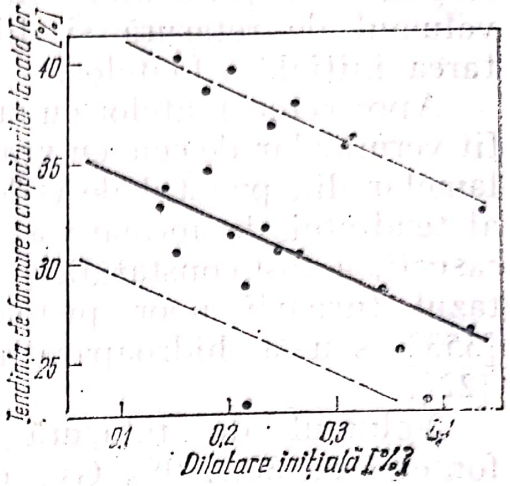


Fig. 4.93. Influența dilatării inițiale asupra tendinței de formare a crăpăturilor la cald (corelație stabilită prin prelucrarea datelor lui N.G. Ghirșovici) [318].

Explicînd dilatarea inițială prin acțiunea grafitului apărut la cristalizarea eutectică, printr-o grafitizare indirectă, lucrarea [164] consideră dilatarea inițială ca un factor important de influență asupra formării crăpăturilor la cald.

La fontele albe, la care nu apare dilatarea inițială sau aceasta are valori foarte mici, contracția la solidificare prezintă valori ridicate, ceea ce favorizează apariția crăpăturilor la cald.

Aliajele la care apare dilatarea inițială au o tendință mai scăzută de a prezenta crăpături la cald, deoarece contracția piesei începe mai tîrziu, cînd există deja o rezistență destul de ridicată a fontei.

O dependență similară între dilatarea inițială și formarea crăpăturilor la cald a fost constatată și în cazul unor oțeluri, aliate cu crom, nichel și molibden [304]. La aceste oțeluri a fost înregistrată o dilatare inițială în limitele 0,02...0,15% (majoritatea sub 0,06%) cu atît mai mare cu cît carbonul prezenta valori mai mari, respectiv odată cu creșterea cantității de carburi apărute în structură.

La valori mai mari ale dilatării inițiale, crăpăturile la cald au fost înregistrate în mai mică măsură.

Aliajul în curs de solidificare opune o anumită rezistență tendinței de contracție, crăpăturile apărînd în momentul în care a-

ceastă rezistență este depășită. Crăpăturile la cald apar deci în zonele cu rezistență mecanică minimă, din care cauză o serie de defecte cum ari fi incluziuni, pori, microretasuri etc. favorizează formarea acestora.

Frînarea contracției de către forma de turnare conduce în mare măsură la apariția crăpăturilor.

Experimentările efectuate de către autori au scos în evidență comportarea diferită a fontelor, cu diferite forme de grafit, din punctul de vedere al sensibilității de formare a crăpăturilor la cald.

În vederea stabilirii tendinței de formare a crăpăturilor la cald, autorii au utilizat proba prezentată în fig. 4.92. În cadrul experimentărilor au fost utilizate mai multe variante de turnare, rspectiv miez metalic și formă metalică sau din ameste de formare și miez din amestec și formă metalică sau amestec. Fontele utilizate fac parte din domeniul eutectic ($CE = 4{,}10...4{,}40\%$) Probele au prezentat fisuri doar în cazul în care a fost utilizat miez metalic. În tabelul 4.26 este prezentat modul de fisurare a probelor, în condițiile utilizării miezului metalic și a formei din amestec de formare, fontele fiind turnate la 1400°C.

Tabelul 4.26

FISURAREA PROBELOR TURNATE

Fonta turnată	Număr de fisuri	Lungimea fisurii mm	Grosimea fisurii mm
Fgl	2	(10); (50); L_{tot} = 60 mm	(0,1); (1...1,5)
Fgn	1	22	0,2...1,0
Fgv	3	(22); (3); (18); L_{tot} = =43 mm	(0,5); (0,3); (1,0)

Comportarea fontelor cu grafit lamelar, vermicular și nodular, din punctul de vedere al sensibilității la formarea crăpăturilor la cald este prezentată în fig. 4.94.

Creșterea gradului de compactitate a grafitului, respectiv trecerea de la grafitul lamelar la cel vermicular și nodular este însoțită de mărirea valorii dilatării inițiale, ceea ce contribuie la micșorarea contracției la solidificare și deci și a tendinței de formare a crăpăturilor la cald.

Scanned with OKEN Scanner

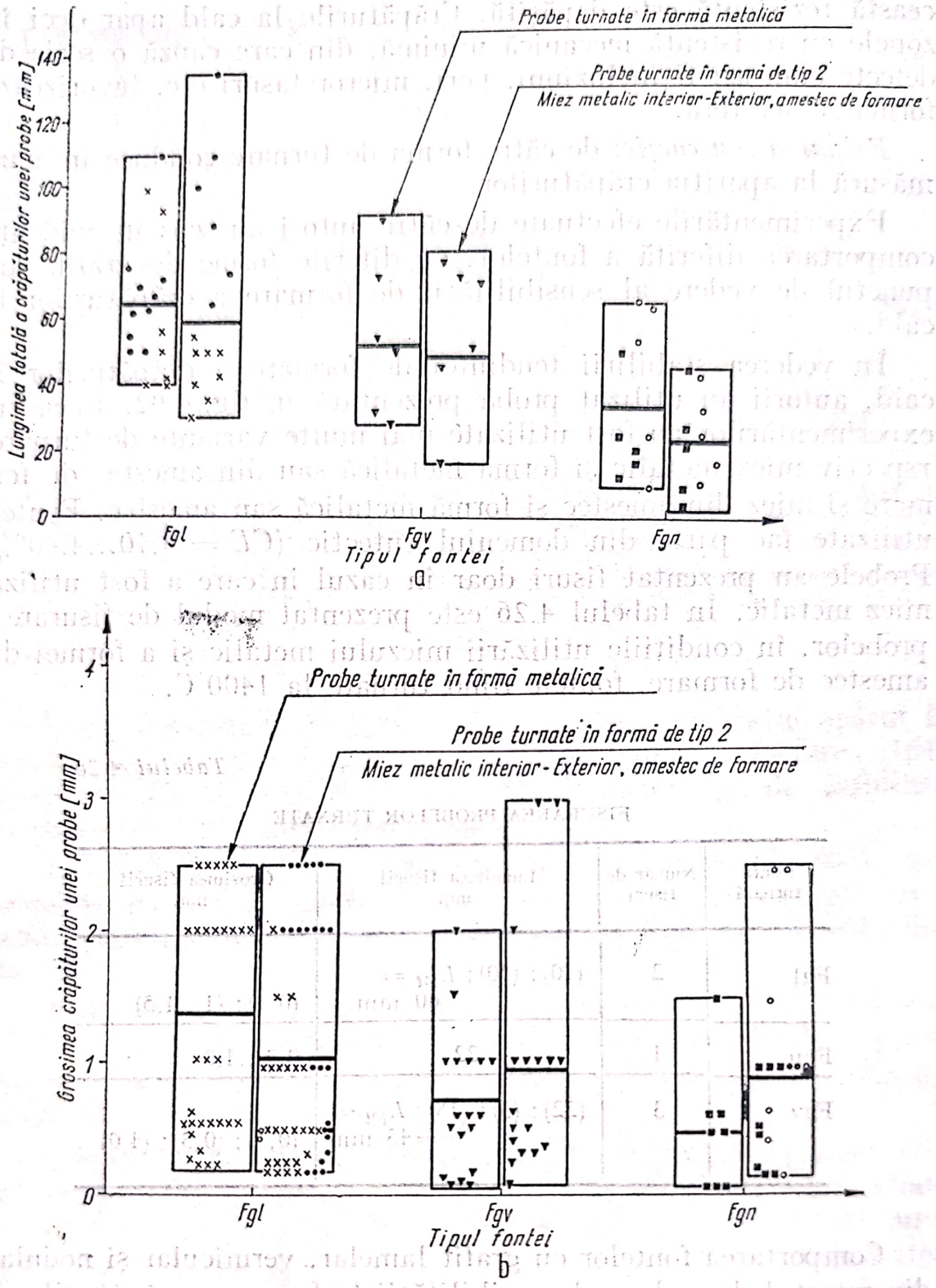


Fig. 4.94. Lungimea totală (*a*) și grosimea (*b*) fisurilor unei probe.

4.4.4. Fluiditatea

Principalul element din compoziția fontei care determină mărirea accentuată a fluidității este fosforul. O creștere a conținutului acestui element pînă la 0,3% conduce la mărirea fluidității de

Scanned with OKEN Scanner

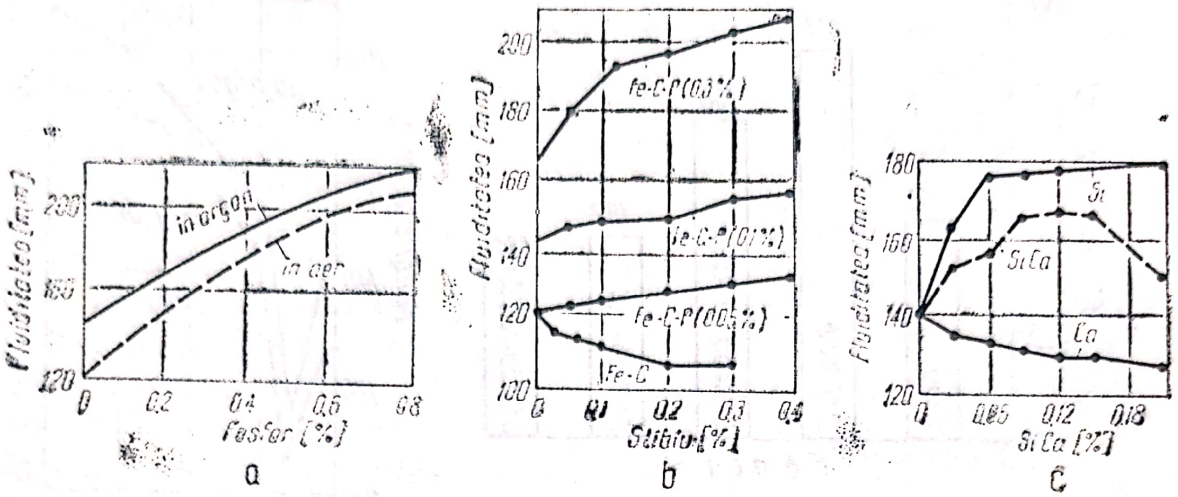


Fig. 4.95. Influența fosforului (*a*), antimoniului (*b*) și SiCa (*c*) asupra fluidității fontelor [146].

1,5 ori, deși temperatura lichidus scade doar cu cîteva grade, datorită eutecticului fosforos (fig. 4.95, *a*).

O serie de elemente, cum ar fi antimoniul, măresc valoarea fluidității fontelor, la un conținut de 0,1...0,3% P (fig. 4.95, *b*).

Alte elemente măresc solubilitatea fosforului și micșorează tendința de formare a eutecticului fosforos, astfel că determină micșorarea fluidității. Astfel, creșterea conținutului de cupru de la 0,1 la 3,0% nu schimbă practic fluiditatea unor fonte cu 3,42% C, 1,84% Si, 0,56% Mn, 0,102% S, 0,108% P. Totuși, în fontele cu fosfor ridicat (0,351% P), care conțin și 0,15% Sb, cuprul neutralizează influența antimoniului asupra fluidității (fig. 4.96).

Modificarea fontelor cu SiCa determină, pe ansamblu, o mărire a fluidității, datorită acțiunii pozitive a siliciului, deși calciul micșorează fludiditatea [146].

După alți autori, prezența calciului în modificatori conduce la creșterea valorii fluidității [222].

Manganul nu influențează practic fluiditatea aliajelor Fe-C, în absența sulfului. În fontele ce conțin sulf, manganul determină micșorarea fluidității datorită formării compușilor MnS, greu futibili, ce măresc vîscozitatea (fig. 4.97) [146].

Fontele cu grafit vermicular au o fluiditate ridicată, comparabilă cu cea a altor tipuri de fonte, la aceeași temperatură de turnare și compoziție chimică (fig. 4.98) [2].

După alți autori, fontele cu grafit vermicular ar poseda fluidități la valori maxime [16].

Astfel, utilizînd fonte cu 3,46...3,98% C, 2,48...2,57% Si, 0,66...0,80% Mn, 0,007...0,013% S se obțin, prin modificarea cu ytriu, fonte cu diferite forme de grafit, a căror fluiditate este prezentată în fig. 4.99 [16].

Scanned with OKEN Scanner

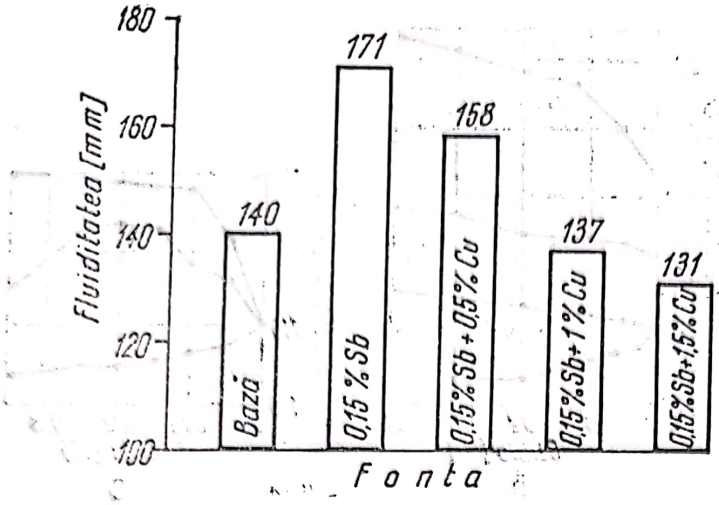
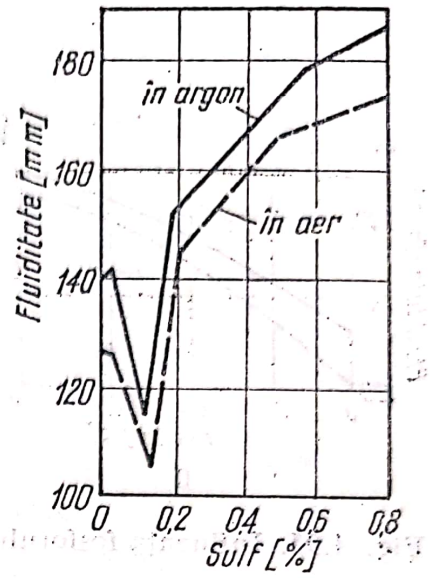


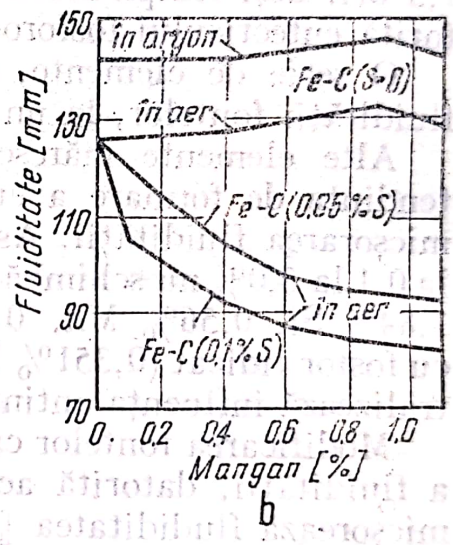
Fig. 4.96. Influența Sb și Cu asupra fluidității fontelor cu 0,351% P [146].



a

Se constată că fluiditatea fontei se mărește de la 900 mm la 1000 mm, odată cu trecerea de la grafitul lamelar (0%Y) la grafitul lamelar modificat (0,05% Y) și cel vermicular (0,10...0,15% Y introdus), după care fluiditatea scade. La 0,2% Y introdus începe să apară cementită liberă, astfel că la modificarea cu 0,25% Y structura conține grafit nodular și cementită, la o masă metalică de bază perlitică [16].

În cadrul experimentărilor efectuate de către autorii acestei lucrări, nu au fost sesizate diferențe



b

Fig. 4.97. Influența sulfului (*a*) și manganului (*b*) asupra fluidității fontelor [146].

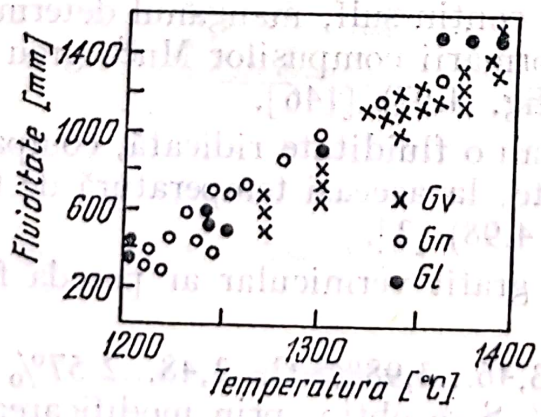


Fig. 4.98. Fluiditatea fontelor cu diferite forme de grafit [2].

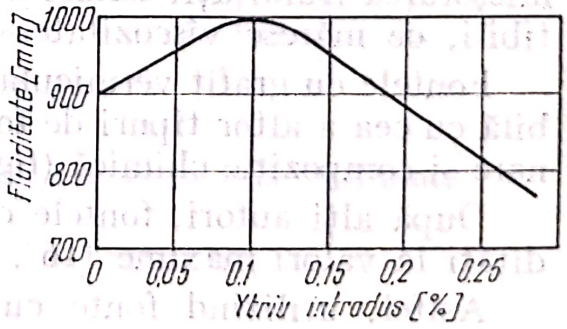


Fig. 4.99. Influența ytriului asupra fluidității fontelor [16].

Scanned with OKEN Scanner

între fontele cu grafit vermicular și nodular, de aceeași compoziție chimică, din punctul de vedere al fluidității la temperaturi de turnare egale. Avînd însă în vedere faptul că inocularea fontei decurge cu o scădere a temperaturii cu 10...30% mai puțin decît în cazul obținerii fontelor cu grafit nodular, există posibilitatea obținerii unor valori mai mari pentru fluiditate.

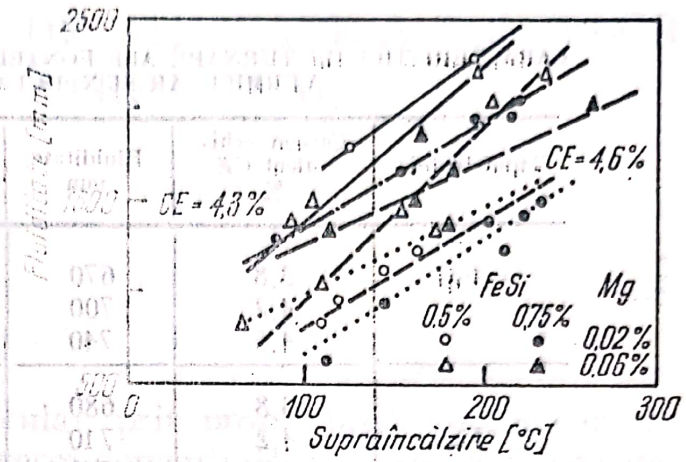


Fig. 4.100. Fluiditatea fontelor, la diferite grade de supraîncălzire (Gv la 0,02% Mg și Gn la 0,06% Mg) [72].

După [333] fontele cu grafit vermicular prezintă o fluiditate ceva mai mică decît cea a fontelor cu grafit lamelar, la același carbon echivalent. Totuși, se remarcă faptul că mărcile de fontă cu grafit lamelar, de înaltă rezistență, se obțin numai la un carbon echivalent scăzut, în timp ce în cazul fontelor cu grafit vermicular, caracteristici ridicate se obțin și la valori mai mari ale carbonului echivalent. Rezultă deci că trecerea de la fonta cu grafit lamelar la cea cu grafit vermicular nu determină o înrăutățire a fluidității.

Fluiditatea unor fonte modificate, eutectice și hipereutectice a fost analizată în cadrul lucrării [72]. Pentru diferite grade de supraîncălzire sînt obținute valori mai ridicate ale fluidității, atît în cazul fontelor cu grafit vermicular (0,02% Mg_{rem}), cît și al celor cu grafit nodular (0,06% Mg_{rem}). (fig. 4.100) [72].

Într-un alt caz se constată că fontele cu grafit vermicular au o fluiditate de același ordin de mărime ca și fontele cu grafit lamelar [268].

La variația carbonului echivalent în limitele 3,8...4,6%, fontele cu grafit vermicular prezintă o fluiditate intermediară, între cele cu grafit lamelar și nodular (tabelul 4.27). Fontele au fost obținute prin modificarea cu FeSiCaMg + Al [260].

Segregații-incluziuni. Prezența în modificatorii pentru obținerea fontelor cu grafit vermicular a unor elemente ca Mg, Ce, Ca determină formarea, ca și în cazul Fgn, a „petelor negre". Cantitatea acestor incluziuni crește odată cu mărirea conținutului de sulf și a carbonului echivalent. Astfel, mărirea conținutului de sulf de la 0,02 la 0,04% a determinat creșterea cantității de incluziuni de patru ori, situație înregistrată și în cazul creșterii car-

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.27

CARACTERISTICI DE TURNARE ALE FONTELOR CU GRAFIT LAMELAR VERMICULAR ȘI NODULAR [260]

Tipul fontei	Carbon echivalent *CE* %	Fluiditate mm	Volumul retasurii %	Contracția liniară %
Fgl	3,8	670	2,9	1,28
	4,2	700	2,1	1,19
	4,6	740	1,2	1,12
Fgv	3,8	680	3,3	1,20
	4,2	710	2,4	1,11
	4,6	760	1,5	1,05
Fgn	3,8	720	5,2	0,98
	4,2	780	4,1	0,81
	4,6	820	3,6	0,77

bonului echivalent de la 4,0 la 4,6% [333]. Măsurile de prevenire a formării acestor incluziuni sînt similare celor utilizate la fontele cu grafit nodular, și se referă în principal la reducerea conținutului de sulf.

Scanned with OKEN Scanner

5. DOMENII DE UTILIZARE A FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR

Fontele cu grafit vermicular, prin proprietățile care le caracterizează, găsesc cele mai diverse domenii de utilizare, a căror gamă se lărgește în permanență.

În general, fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate prin tenacitate ridicată, conductibilitate termică și rezistență la șoc termic la valori ridicate, capacitate mărită de amortizare a vibrațiilor etc., care permit utilizarea acestui tip de fonte la turnarea unui număr mare de piese.

5.1. Utilizarea fontelor cu grafit vermicular la turnarea lingotierelor

Lingotierele constituie un domeniu important de utilizare a fontelor cu grafit vermicular, în mai multe țări avînd o pondere importantă în structura utilajului de turnare.

Conductibilitatea termică ridicată, rezistența ridicată la șoc termic, capacitatea redusă la oxidare, precum și sensibilitatea redusă la influența grosimii de perete, respectiv posibilitatea obținerii unor separări de grafit cu grad ridicat de compactitate și la grosimi mari de perete (150—300 mm) constituie principalele argumente pentru utilizarea acestor fonte la turnarea lingotierelor.

Analizînd viitorul lingotierelor, [134] se constată că acestea reprezintă 15% din totalul producției de piese turnate. În vederea micșorării consumului specific de lingotiere, se propun mai multe direcții de acțiune: a) dezvoltarea tehnologiei de turnare rapidă a oțelului; b) reproiectarea lingotierelor; c) îmbunătățirea condițiilor de exploatare; d) utilizarea a noi materiale.

Tradițional lingotierele sînt turnate din fontă cenușie, cu carbon ridicat și sulf și fosfor scăzut. În cazul lingotierelor de pînă la 6,0 t se recomandă utilizarea fontelor cu grafit nodular, în timp ce la lingotierele mai mari fontele cu grafit vermicular asigură o durabilitate cu 1,5...2,0 ori mai mare decît în cazul fontelor cu grafit lamelar [109, 134].

Scanned with OKEN Scanner

O turnătorie produce lingotiere din fontă cu grafit vermicular, în anul 1980 avînd turnate din acest material circa 100 000 t (5000 lingotiere) [109].

Fontele cu grafit vermicular sînt obținute în două variante. Într-o secție fonta este evacuată din cubilou, printr-un sistem de reținere a zgurei și trecută într-o oală, în care se adaugă materiale pentru desulfurare și corectarea compoziției chimice.

Într-o altă secție, compoziția chimică necesară este realizată direct în cubilou, acesta lucrînd cu zgură bazică.

Se utilizează modificatori din sistemul FeSiMgCaCeAl, cu următoarea compoziție chimică: 7—9% Mg, 0,5% Ce, 3,5...4,0% Ca, 44...46% Si, 1,0...1,5% Al. Cantitatea de modificator utilizat variază în limitele 0,6...1,0%, în funcție de conținutul inițial de sulf și temperatura de modificare. Postmodificarea este realizată cu 0,5% FeSi75, astfel că este evitată apariția cementitei libere și este favorizată formarea feritei.

O compoziție tipică a unei fonte cu grafit vermicular, pentru turnarea lingotierelor este următoarea: 3,7% C, 1,99% Si, 0,18% Mn, 0,047% P, 0,005% S, 0,01% Al, 0,015% Cr, 0,048% Cu, 0,001% Mo, 0,010% Sn, 0,016% V.

Avînd în vedere faptul că fontele cu grafit vermicular au o tendință de formare a retasurii ceva mai mare decît cele cu grafit lamelar este necesar ca lingotierele să fie prevăzute cu maselote încălzite, iar formele cu o rigiditate mai mare, ceea ce asigură obținerea lingotierelor fără retasură.

Obținerea unor lingotiere din fontă cu grafit vermicular, într-o producție stabilă, este asigurată, în cadrul turnătoriei amintite, de luarea următoarelor măsuri:

— urmărirea calității încărcăturii, care trebuie să constea din materiale de proveniență cunoscută, cu un conținut scăzut de sulf și fosfor;

— corectarea carbonului și siliciului, pentru asigurarea unui grad de saturație în carbon peste 1,0;

— stabilirea precisă a masei fontei lichide, supuse modificării, ca și a conținutului în sulf a acesteia;

— corelarea consumului de modificator cu cantitatea de fontă modificată și conținutul său de sulf;

— stăpînirea intervalului de temperatură optim pentru modificare, avînd în vedere faptul că la temperaturi ridicate gradul de asimilare a magneziului este scăzut, în timp ce la temperaturi scăzute se realizează o zgurificare a modificatorului;

— controlul fiecărei lingotiere din punctul de vedere al compoziției chimice și structurii.

Scanned with OKEN Scanner

Toate lingotierele din fontă cu grafit vermicular produse sînt controlate cu ultrasunete, pentru a se stabili gradul de compactizare a grafitului.

Lingotierele sînt considerate corespunzătoare, respectiv grafitul este vermicular, dacă viteza sunetului prin pereții lingotierelor este de 4 700...5 100 m/s.

Utilizarea fontelor cu grafit vermicular, în locul celor cu grafit lamelar, pentru turnarea lingotierelor, determină micșorarea consumului de lingotiere, de la 17,71 kg/t oțel (640 lingotiere Fc) la 12,51 kg/t oțel (322 lingotiere Fgv).

Temperatura de turnare a oțelului în lingotierele din fontă cu grafit vermicular este de 1560—1570°C, iar timpul de menținere a lingoului în lingotieră este de 2...6 h, funcție de marca oțelului. După îndepărtarea lingoului, lingotierele sînt răcite 24 h, pînă la o nouă turnare.

Reducerea consumului de lingotiere pe tona de oțel față de cazul folosirii fontei cu grafit lamelar a condus la o economisire de 1 mil. lire sterline/an [108, 109].

Menținînd 32 săptămîni lingotierele la 500°C nu au fost constatate deosebiri față de cazul turnării din fontă cu grafit lamelar, în timp ce la 600°C, lingotierele din fontă cu grafit vermicular au o tendință mai mică de oxidare [108, 109].

În prezent, se produc lingotiere din Fgv în U.R.S.S., Suedia, Anglia, R.F.G., R.S.România [253].

O altă turnătorie modernizată recent, a fost prevăzută cu un sistem de elaborare duplex cubilou cu aer cald — cuptor cu inducție cu canal (60 t), ceea ce asigură o compoziție chimică controlată, din punctul de vedere al conținutului de Si, S, P, Mn, Ti, favorizînd obținerea unor lingotiere din fontă cu grafit vermicular și nodular de bună calitate [392].

O experiență bogată în domeniul turnării lingotierelor din fonte cu grafit vermicular și nodular se remarcă în U.R.S.S. unde au fost stabilite mai multe tehnologii de modificare [173, 174, 357].

Adaosuri scăzute de magneziu (0,04...0,06%Mg) sau ceriu (0,02...0,04%FeCeMM) au condus la creșteri importante ale caracteristicilor fontelor utilizate la obținerea lingotierelor [357]. Astfel, la un conținut de magneziu remanent de 0,005...0,007% (0,04... ...0,06% Mg introdus) rezistența la tracțiune a crescut cu 15... ...20%, iar cea la încovoiere cu 10...15%, în timp ce la un adaos de 0,02...0,04 % FeCeMM au fost obținute proprietăți mecanice îmbunătățite cu 6...12%. În cazul fontelor elaborate în cubilou și turnate în lingotiere de 1,3...4,0 t, se recomandă adaosurile prezentate mai înainte, care asigură scăderea conținutului de sulf cu 10...30%, și mărirea durabilității de 1,4...2,0 ori.

Scanned with OKEN Scanner

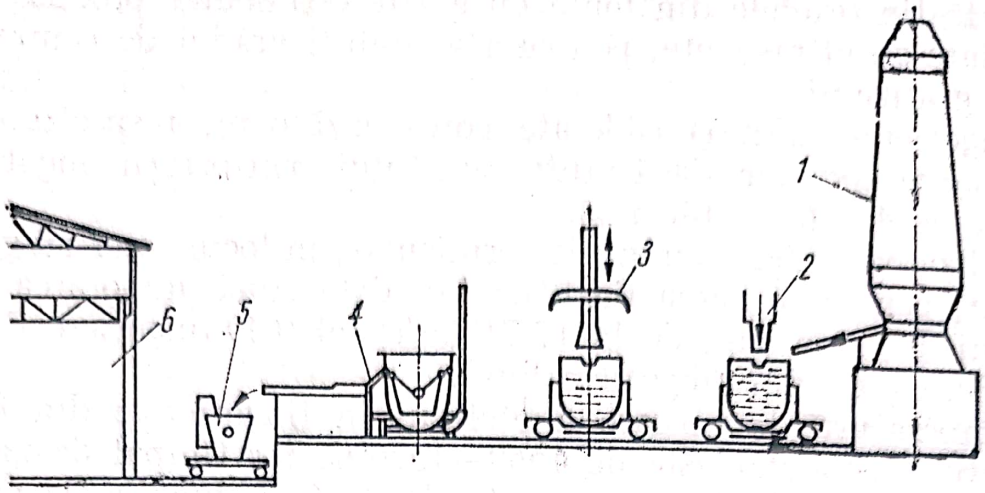


Fig. 5.1. Schema tehnologiei de obținere a lingotierelor din fontă de primă fuziune cu grafit vermicular și nodular prin modificarea cu Mg [173]:

1 — furnal; *2* — dozare FeSi45; *3* — inoculare cu magneziu; *4* — turnarea fontei în oalele de transprot în turmătorie (*5*); *6* — turnătoria de lingotiere.

La C.U.G. Iași au fost produse lingotiere din Fgv, elaborarea avînd loc în cuptoare cu inducție, pentru modificare folosindu-se FeSiTiMgCe [93]. Lingotiere din Fgv, se produc și în R.P. Chineză [463].

Lingotiere din fontă de primă fuziune, cu grafit vermicular și nodular, pot fi obținute și prin modificarea cu magneziu metalic, într-un flux continuu furnal-turnătorie, conform tehnologiei prezentate în fig. 5.1 [173].

Sînt utilizate fonte de furnal, de afinare, cu compoziția chimică: 4,0...4,3%C, 0,65...1,3% Si, 0,93...1,4% Mn, 0,03...0,06% S, 0,08...0,12% P, cu temperatura de evacuare din furnal de 1450—1460°C.

Corectarea conținutului de siliciu se realizează prin adaos de FeSi45(5...15 mm), în timpul umplerii oalei cu fontă la furnal (*2*) sau după modificarea cu magneziu (*3*) sau în timpul umplerii oalei de transport la turnătorie (*5*).

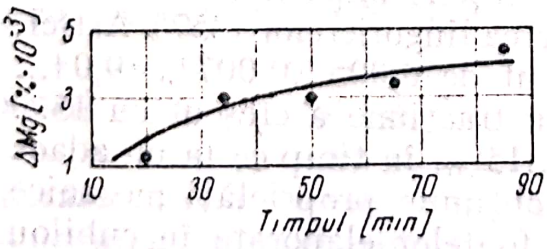


Fig. 5.2. Pierderile de magneziu în timpul transportului și turnării [173].

După tratarea cu magneziu a fontei, la evacuarea din furnal se formează o mare cantitate de zgură, cu efect izolant, astfel că pierderile de magneziu, în timpul transportului, sînt minime (fig. 5.2). În cea mai mare parte, pierderile de magneziu se înregistrează la transvazarea fontei din oala de furnal în cea de tur-

Scanned with OKEN Scanner

nare și la umplerea formei. Fonta din oala de transport la turnătorie este protejată cu un strat de cocs.

Adaosul de ferosiliciu determină creșterea consumului de magneziu, datorită faptului că cu acest feroaliaj se introduce în fontă oxigen și sulf. Această situație se înregistrează la ambele variante de asimilare a ferosiliciului (înainte și după modificarea cu magneziu).

La conținuturi scăzute de siliciu (Si < 1,0%) și ridicate de mangan (Mn > 1,0%), valori de peste 0,03% Mg_{rem} determină apariția unor rețele de cementită, care determină scoaterea din uz a lingotierelor, după primele turnări.

Lingotierele din fontă cu grafit vermicular au o durabilitate de 95...100 turnări, foarte apropiată de cea a fontelor cu grafit nodular (100 turnări) și mult mai mare decît în cazul lingotierelor din fontă cu grafit lamelar (61,6 turnări).

În cazul fontelor cu grafit vermicular, cauza principală a scoaterii din uz o constituie crăpăturile longitudinale (70% din cazuri).

În cazul lingotierelor din fontă cu grafit nodular, predomină rețelele de arsuri, crăpăturile fiind doar superficiale (15...25 mm la 100 turnări).

Deformarea pereților se înregistrează numai la lingotierele din fontă cu grafit nodular pe toată grosimea peretelui, fără să constituie o cauză principală a scoaterii din exploatare.

Durabilitatea ridicată a acestor lingotiere (cu 40...50% mai mare decît a celor obișnuite) a determinat reducerea consumului de lingotiere de la 24 la 16 kg/t oțel.

În vederea obținerii lingotierelor mari, din fontă modificată cu magneziu granular se utilizează instalația prezentată în fig. 5.3. [362].

Fonta lichidă (9,0...9,5 t) este preluată din antecreuzetul cubiloului, la 1280...1320°C, în oala rotativă, avînd loc o desulfurare cu 0,35...0,5% sodă calcinată. Magneziul granular, în cantitate de 2,4...2,6 kg/t, este introdus în fontă cu ajutorul aerului comprimat, la 50...55 m^3/h, timp de 3...5 min. Postmodificarea se realizează cu 5...8 kg/t FeSi75. În timpul modificării temperatura scade cu 10...20°C.

Fontele sînt turnate în formă la 3...4 min de la modificare, astfel că pierderile de magneziu nu depășesc 0,01%.

La 0,023...0,030%Mg_{rem}, lingotierele au grafit vermicular, în timp ce la valori de peste 0,04%Mg_{rem} este asigurată obținerea grafitului nodular. Durabilitatea lingotierelor este mărită de la 42,6 la 65,8 turnări.

O altă variantă de producere a lingotierelor prevede utilizarea magneziului pentru desulfurare (0,05...0,1%Mg) și modificarea fontelor cu 0,85...1,1% modificatori complecși, ce conțin 4...7%Mg

Scanned with OKEN Scanner

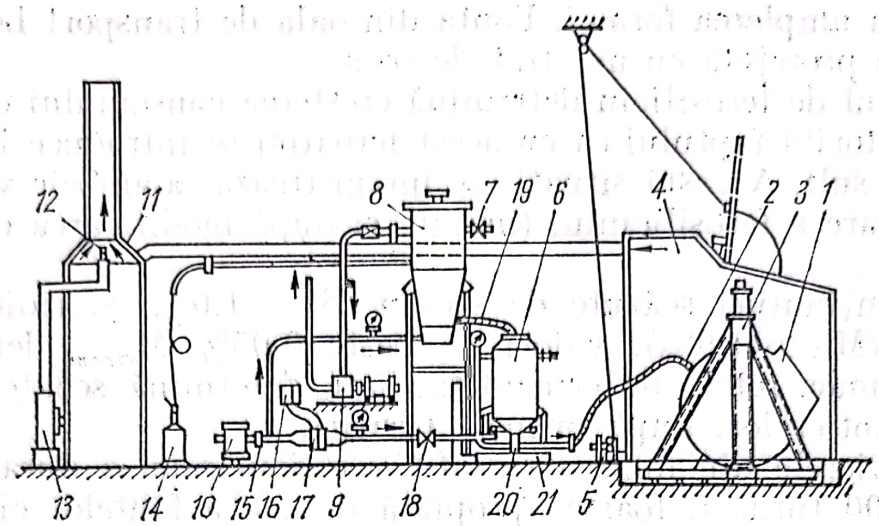


Fig. 5.3. Instalație pentru modificarea cu magneziu granule [362]:

1 — oală rotativă; *2* — furtun; *3* — stand; *4* — cameră pentru oala de modificare; *5* — sistem antrenare; *6* — alimentator pneumatic; *7* — ventil; *8* — filtru; *9* — pompă vid; *10* — suflantă *11* — cameră dispersie; *12* — ejector gaze; *13* — ventilator; *14* — buncăr; *15* — conductă aer; *16* — înregistrator; *17* — debitmetru; *18* — ventil; *19* — furtun; *20* — dozator; *21* — înregistrator.

max. 6% Ca, 2...4%PR. Turnarea a 35 de lingotiere în diferite variante de modificare a scos în evidență faptul că în cazul fontelor cu grafit vermicular au fost obținute durabilități de 90...101 turnări, față de 60...70 la fontele cu grafit lamelar și 120...125 în cazul fontelor cu grafit nodular (tabelul 5.1) [174].

Fontele cu grafit vermicular, cu 3,6...5,0%C, 1,45...2,0%Si, 0,4...1,0%Mn, 0,001...0,009%S, 0,05...0,12%Ce, obținute în urma modificării cu ceriu, în U.R.S.S. sînt utilizate la turnarea lingotierelor din anul 1968 [416].

Tabelul 5.1

LINGOTIERE OBȚINUTE PRIN DESULFURARE CU Mg ȘI MODIFICARE CU FeSiCaMgCe [174]

Variantă de modificare	Prelucrare cu		Forma grafitului	Masa metalică	Durabilitatea lingotierei (nr. de turnări)
	Mg pentru desulfurare %	Modificator complex %			
1	—	2,0	Gn	P_{45}	120
2 a	0,05	0,85	Gl	P_{70}	65
2 b	0,05	1,3	Gv	P_{90}	92
3 a	0,1	0,5	65% Gn + 35% Gv	P	90
3 b	0,1	0,85	Gn	P_{85}	115
3 c	0,1	1,1	Gn	P_{85}	125

O amplă analiză a condițiilor de utilizare a fontei de primă fuziune, direct la turnarea pieselor evidențiază faptul că mici adaosuri de elemente din grupa pămînturilor rare favorizează formarea grafitului vermicular. Astfel de fonte, cu rezistență și conductibilitate termică ridicate și cu o rezistență la uzare acceptabilă constituie un material deosebit pentru turnarea lingotierelor [60].

La C.S.V. Călan au fost asimilate lingotiere din fontă de primă fuziune, cu grafit vermicular.

Fonta destinată modificării este preluată de la furnal în oale de turnare obișnuite și transportată la turnătorie, unde are loc modificarea cu 0,8...0,9%FeSiCaAlTiMg.

În tabelul 5.2, se prezintă principalii parametri ai procesului de modificare, iar în tabelul 5.3 variația compoziției chimice în cazul unei lingotiere (lingotiera nr. 8456/1976).

Tabelul 5.2

PARAMETRI AI PROCESULUI DE MODIFICARE A FONTELOR DE PRIMĂ FUZIUNE

Parametrul	U.M.	Valori
Cantitatea de fontă supusă modificării	kg	11...12.10³
Durata transportului de la furnal la turnătorie	min	25...35
Scăderea temperaturii fontei în timpul transportului	°C	60...100
Temperatura fontei la modificare	°C	1300...1350
Cantitatea de modificator	kg	88...109
Scăderea temperaturii la modificare	°C	30...60
Staționarea fontei după modificare	min	4...10

Tabelul 5.3

VARIAȚIA COMPOZIȚIEI CHIMICE A FONTELOR DE PRIMĂ FUZIUNE (LINGOTIERA 8456/1976)

Tipul fontei	Compoziția chimică, în %					Carbon echivalent *CE*, %
	C	Si	Mn	P	S	
La furnal	4,17	2,11	0,58	0,163	N.D.	4,852
Înainte de modificare	4,09	2,17	0,62	0,140	0,075	4,783
După modificare	3,87	2,40	0,61	0,153	0,024	4,636
În lingotieră	3,78	2,12	0,70	0,168	0,026	4,466
Variații*)	ΔC −0,39	ΔSi +0,23	—	—	ΔS −0,051	Δ*CE* −0,386

*) În cazul Si și S sînt prezentate variațiile la modificare, iar pentru C și *CE*, variațiile totale

Scanned with OKEN Scanner

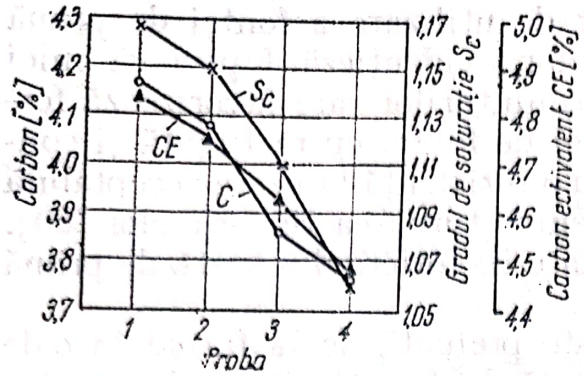


Fig. 5.4. Limitele de variație ale carbonului (C) și gradului de saturație în carbon (S_c) în cazul fontelor de primă fuziune, cu grafit vermicular, turnate în lingotiere:

1 — la furnal; *2* — înainte de modificare; *3* — după modificare; *4* — după solidificare.

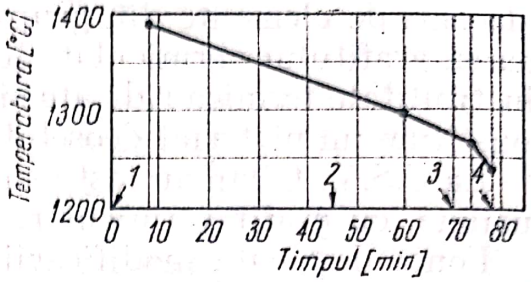


Fig. 5.5. Variația temperaturii fontei cu grafit vermicular, turnată în lingotieră (Ling. 8372-IVC):

1 — evacuarea din furnal; *2* — intrarea fontei în turnătorie; *3* — modificare; *4* — turnare.

Conținutul de carbon scade în mare măsură din momentul evacuării fontei din furnal și pînă la solidificarea acesteia, datorită eliminării grafitului primar. În această privință se pot remarca trei perioade: transportul fontei la turnătorie, modificarea și solidificarea pieselor turnate. Experimentările efectuate au scos în evidență faptul că scăderea maximă a carbonului (0,2... ...0,3%) se realizează în timpul modificării, datorită barbotării fontei. În timpul transportului conținutul de carbon scade cu 0,05...0,15%, iar în timpul solidificării, din cauza flotării grafitului, cu 0,07...0,12%.

În urma modificării conținutul de siliciu în compoziția fontei crește cu 0,2...0,3%, dar pe ansamblu gradul de saturație în carbon al fontei scade (fig. 5.4).

Fontele turnate au un grad de saturație în carbon ridicat ($S_c \geqslant \geqslant 1,05$), dar mai scăzut decît cel al fontei în momentul evacuării din furnal ($S_c \geqslant 1,15$).

În vederea micșorării pierderilor de căldură în timpul transportului, fonta lichidă din oală este protejată cu un strat de praf de cocs, ceea ce asigură o scădere a temperaturii sub 100°C (fig. 5.5).

Caracteristicile structurale ale lingotierelor turnate din Fgv sînt prezentate în tabelul 5.4.

Fontele de primă fuziune, cu grafit vermicular, solidificate în lingotiere, conțin separări de grafit ce nu depășesc 150 μm,la un raport $L/g \leqslant 10$.

Modificarea fontelor acționează atît asupra grafitului primar, cît și asupra celui apărut la temperatura eutectică. În comparație cu fonta nemodificată, turnată în lingotiere, cantitatea de grafit primar este cu mult mai scăzută, acesta prezentînd dimensiuni mult mai mici, ($L < 200$ μm) la un raport $L/g = 2...8$.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.4

CARACTERISTICILE FONTELOR TURNATE ÎN LINGOTIERE

Tipul fontei turnate în lingotieră	S_c	Perlită		Grafit		Rezistența la tracțiune R N/mm²	Densitatea g/cm³
		Cantitate %	Grad de dispersie µm	Cantitate %	Mărime µm		
De furnal, cu grafit lamelar	1,15	Max. 3	—	> 12	250...500	70,2	6,8
De cubilou, cu grafit lamelar	1,01	Max. 15	1,3...1,6	8...12	100...250	156	7,2
De furnal, cu grafit vermicular	1,11	Max. 3	—	> 12	50...150	168	6,98

Fonta de primă fuziune modificată are un grad mai redus de impurificare, ceea ce îi conferă atît o densitate mai mare, cît și o conductibilitate termică și caracteristici mecanice superioare, la un grad de saturație în carbon ridicat.

Fonte cu grafit vermicular, de furnal, au fost turnate în forme realizate cu aceeași garnitură de model, ca și în cazul turnării fontelor cu grafit lamelar.

Lingotierele turnate (LN 80) nu au mai necesitat tratament termic, structura acestora fiind preponderent feritică, direct din turnare, fără cementită liberă. În cazul lingotierelor similare din fontă cu grafit nodular este necesar un tratament termic de recoacere grafitizantă, care determină mărirea costului de producție.

Lingotiere din fontă cu grafit vermicular și nodular au fost obținute și în cazul modificării fontelor de a doua fuziune, elaborate în cubilou și cuptoare cu inducție, modificarea efectuîndu-se cu FeSiCaAlTiMg sau FeSiCaMg.

În cazul unor fonte cu mangan scăzut, cu compoziția chimică 3,85...3,90%C, 2,59...2,61%Si, 0,15...0,25%Mn, 0,078...0,102%P, 0,015...0,025%S, modificarea cu 0,8...1,2%FeSiCaMg (4...8%Mg), a condus la obținerea grafitului vermicular. Fontele au prezentat, la lingotierele de 10 t (150 mm grosime), o structură formată din peste 90% ferită, separările de grafit vermicular avînd un raport între lungime și grosime cuprins în limitele 4...20 (tabelul 5.5). Structura fontelor este prezentată în fig. 5.6.

Modificatorul a fost introdus în fontă cu ajutorul unui clopot. Parametrii tehnologiei de modificare-turnare sînt prezentați în tabelul 5.6.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.5

STRUCTURA FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR TURNATE ÎN LINGOTIERE

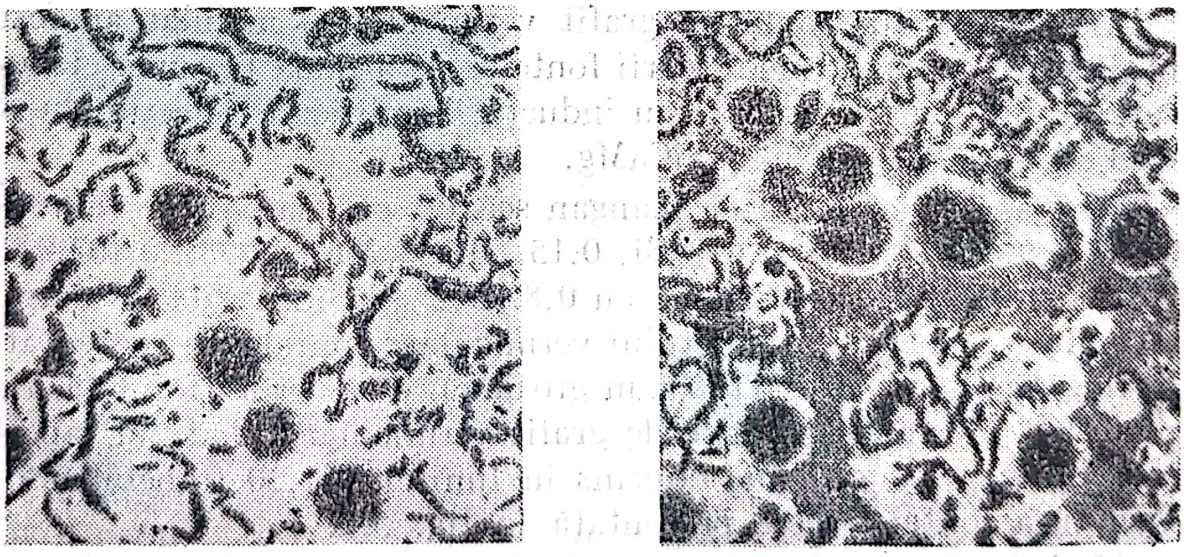
Tipul fontei	Grafit, în %		Raportul între lungimea și grosimea grafitului L/g	Ferită, %
	Gv	Gn		
Probe, ∅ 20 mm	95	5	4... 7	55...70
Lingotieră	100	—	4...20	> 90

La folosirea midificatorilor din sistemul FeSiCaAlTiMg, grafitul vermicular este obținut în cazul unor compoziții chimice care cuprind 0,015...0,04% Mg, 0,05...0,15%Ti și 0,03...0,20%Al. Astfel de lingotiere (10 t) și podurile de 25 t se produc și la Î.M. Alba Iulia, cu utilizarea modificatorilor *MODIVER* realizați de autori.

Lingotierele turnate din fontă cu grafit vermicular au prezentat durabilități cu 40...70% mai mari decît cele produse din fonte cu grafit lamelar.

În scopul urmăririi comportării în exploatare a lingotierelor au fost turnate piese care reproduc la scara 1 : 10 lingotiere cu secțiune pătrată, de 4 t [70]. Aceste lingotiere, din fontă cu grafit lamelar, vermicular și nodular au fost utilizate la turnarea unor lingouri din oțel manganos, cu 13,5%Mn.

În tabelul 5.7 este prezentată ponderea separărilor de grafit, afectate de microfisuri, pentru cele trei tipuri de fonte. Se constată că după 10 turnări lingotierele au o comportare asemănătoare, dar se remarcă tendința grafitului lamelar de a favoriza formarea



a b

Fig. 5.6. Structura fontelor cu grafit vermicular, turnate în lingotiere (lingotiera 4167-IVC) (× 100).

Tabelul 5.6

PARAMETRI TEHNOLOGIEI DE MODIFICARE A FONTELOR DE A DOUA FUZIUNE

Caracteristica	U.M.	Valori
Cantitatea de fontă supusă modificării	t	12...15
Temperatura fontei la modificare	°C	1350...1400
Cantitate de modificator FeSiCaMg (4—8% Mg)	kg	120...150
Durata operației de modificare (modificare cu clopot)	min	3...4
Postmodificare (FeSi 75)	kg	40...60
Durata de menținere după modificare	min	8...15
Turnare:		
— Temperatura	°C	1250...1320
— Durata turnării	s	180...240
— Viteza de turnare	kg/min	4000

microfisurilor. După 78 de turnări, în timp ce la fontele cu grafit vermicular și nodular doar o mică parte din separările de grafit sînt afectate de microfisuri, acestea depășesc 75% la fontele cu grafit lamelar.

Tabelul 5.7

PONDEREA SEPARĂRILOR DE GRAFIT ÎN LINGOTIERE AFECTATE DE MICROFISURI (%) [70]

Tipul fontei	10 lingouri turnate						78 lingouri turnate					
	Latura lingotierei			Muchia lingotierei			Latura lingotierei			Muchia lingotierei		
	S_e	C	S_i	S_e	C	S_i	S_e	C	S_i	S_e	C	S_i
Fgl	3,4	1,1	6,8	6,5	5,8	10,6	73	76	87	75	80,2	90,8
Fgv	1,1	1,25	2,1	1,05	1,9	2,6	4,8	7,9	8,4	5,9	9,2	14,6
Fgn	1,5	1,9	2,05	1,9	5,5	2,9	4,2	19,7	10,6	10,9	22	17

Semnificația notațiilor.

S_e — suprafața exterioară a lingotierei;
C — centrul peretelui lingotierei;
S_i — suprafața interioară a lingotierei.

În cazul fontelor cu grafit lamelar lingotierele au prezentat fisuri pe întreaga înălțime după 72 turnări. La aceste tipuri de lingotiere nu s-au înregistrat blocări ale lingoului de oțel, cauza scoaterii din uz fiind crăpăturile.

În cazul lingotierelor din fontă cu grafit vermicular și nodular a fost constatată prezența rețelelor de arsuri precum și blocarea frecventă a lingourilor în lingotieră. De asemenea, la aceste tipuri de fonte au apărut fenomene de topiri locale în peretele lingotierei, ceea ce favorizează blocarea lingoului. Se apreciază că la fisurarea acestor lingotiere au contribuit și solicitările mecanice la care au fost supuse în vederea extragerii lingoului.

Defectele de turnare (incluziuni, sufluri, microretasuri etc.) au favorizat procesul de inițiere și dezvoltare a fisurilor [70].

5.2. Piese pentru motoarele termice

Utilizarea fontelor cu grafit vermicular pentru turnarea pieselor pentru motoare este determinată de următoarele avantaje [125]:

— posibilitatea măririi puterii motoarelor cu pînă la 50% (sau micșorarea corespunzătoare a masei) în raport cu fontele cu grafit lamelar, slab aliate;

— rezistența ridicată la formarea crăpăturilor în zonele critice;

— micșorarea costului pieselor.

Prin mai multe caracteristici, fontele cu grafit vermicular se dovedesc a fi materiale bune pentru turnarea pieselor pentru motoare:

— rezistență la tracțiune de peste 300 N/mm²;

— alungire de min. 2%;

— conducțivitate termică, la 300°C, $\lambda = 0{,}08...0{,}10$ cal/cm.s.°C (33...42 W/mK);

— compactitate ridicată în zona de variații ale grosimii de perete;

— greutatea maselotelor redusă;

— prelucrabilitate bună (140...160 *HB*).

— rezistență ridicată la oxidare.

Fonta cu grafit vermicular este utilizată tot mai mult la turnarea pieselor care intră în componența motoarelor, în special a celor Diesel.

5.2.1. Chiulase și bloc motor

Pentru turnarea chiulaselor motoarelor Diesel se utilizează în mod frecvent următoarele materiale [125, 261]:

— fonte cu grafit lamelar (Fc200...Fc400);

Scanned with OKEN Scanner

— fonte cu grafit lamelar aliate (Fc250...Fc350);

— fonte cu grafit vermicular feritice (Fgv300) și perlitice (Fgv400);

— fonte cu grafit nodular (Fgn400...Fgn600);

— oțel turnat sau forjat.

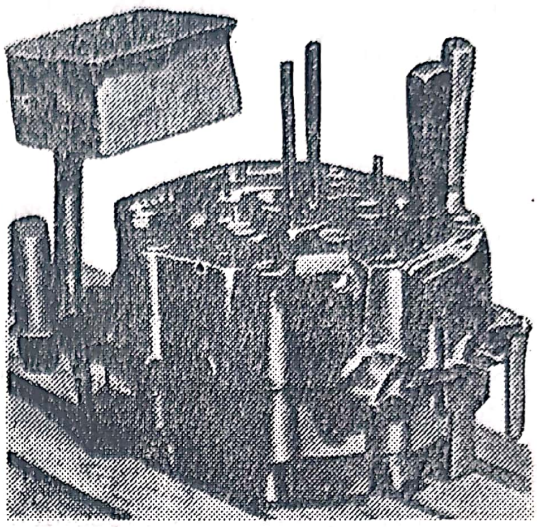


Fig. 5.7. Chiulasă pentru motoare Diesel cu rețeaua de turnare [261].

Fontele cu grafit lamelar slab aliate (Ni-Cr-Mo) cu carbon ridicat (3,7...3,8%C) se utilizează în cazul chiulaselor la care apar tensiuni termice ridicate și tensiuni mecanice moderate. În cazul unor tensiuni termice și mecanice ridicate se recomandă utilizarea fontelor cu grafit lamelar slab aliate (Cr-Mo), cu carbon scăzut (3,2...3,3%C). La nivele ridicate ale tensiunilor mecanice s-a trecut la utilizarea fontelor cu grafit nodular sau a oțelului. Se remarcă faptul că costul chiulaselor turnate din oțel este ridicat, iar în cazul fontelor cu grafit nodular, conductivitatea termică este redusă [261].

În fig. 5.7 este prezentată o chiulasă pentru un motor Diesel, cu sistemul de turnare [261]. Fonta are 3,5%C, 2,5%Si, 0,25%Mn, 0,05%P, max. 0,015%S, $S_c = 1,0$, modificarea avînd loc în oală, cu mischmetall (peste 49%Ce). Modificatorul se adaugă în oală după ce acesta este umplută la 1/3 din volum cu fontă lichidă, postmodificarea avînd loc cu 0,3...0,5% material grafitizant.

Micșorarea conținutului de carbon sub 3,5% sau a siliciului sub 2,1% conduc la apariția cementitei libere și a microretasurilor. Modificarea fontei a avut loc la 1350—1420°C, iar timpul de așteptare pînă la turnare de max. 8 min.

Chiulasele au fost turnate în mai multe variante:

— amestec pe bază de bentonită;

— amestec cu ciment;

— amestecuri cu întărire la rece.

Se remarcă faptul că un amestec de formare cu 1,0% rășini și 0,5% acid fosforic conține în mod obișnuit 0,06%S, care poate ajunge însă și la 0,2%S, în cazul regenerării amestecului sau atunci cînd se mărește cantitatea de acid, în vederea intensificării reacțiilor de întărire. Acest conținut ridicat de sulf al formei poate determina apariția unui strat de grafit lamelar la suprafața piesei. După 3000 h de exploatare, scoaterea din uz a unei chiulase a fost determinată de apariția unor crăpături între orificii, în urma flotării grafitului și prezentei în structură a grafitului lamelar. Chiu-

Scanned with OKEN Scanner

lasele turnate, de 185...1000 kg, pentru motoarele Diesel (425... ...600 rot/min), cu puterea unui cilindru de 300...900 kW și la presiuni ale gazelor de 112...115 bar, au următoarele caracteristici mecanice: R_m = 318...337 N/mm², $R_{0,2}$ = 265...273 N/mm², A = 4,6...5,4% [261].

În tabelul 5.8 sînt prezentate cîteva caracteristici ale tehnologiei de turnare a chiulaselor din fontă cu grafit vermicular, feritice (Fgv 300), cu rezistența la tracțiune de minim 300 N/mm² și alungirea de peste 2,0% [125]. În fig. 5.8 sînt prezentate chiulasele turnate [125]. În cele ce urmează este prezentată tehnologia de turnare a acestor chiulase [125].

Tabelul 5.8

CARACTERISTICI TEHNOLOGICE ALE TURNĂRII CHIULASELOR DIN Fgv [125]

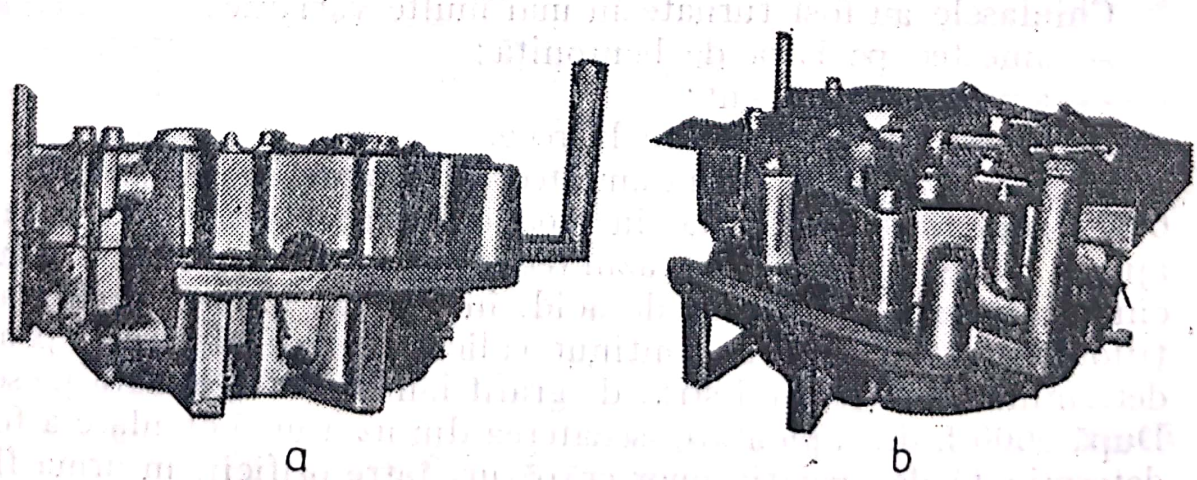
Caracteritica	Valori
Compoziția chimică	3,75% C; 1,6% Si; max. 0,08% P; max. 0,007%S
Masa	512 kg
Temperatura de turnare	1370...1380°C (în formă 1310°C)
Grosime pereți	De la 13 la 85 mm
Grosimea medie pereți	24 mm (modul răcire Z = 1,2 cm)
Amestec de formare	Amestec cu rășini furanice

Timpul maxim de turnare se calculează cu relația:

$$t_{max} = M/\varepsilon \quad [s], \qquad (5.1)$$

în care: M este grosimea medie a pereților piesei (12 mm); ε — viteza de înaintare a frontului de cristalizare la turnarea în forme uscate (0,25 mm/s).

În cazul menționat t_{max} = 48 s.



a b

Fig. 5.8. Chiulase turnate din fontă cu grafit vermicular feritică [125].

Scanned with OKEN Scanner

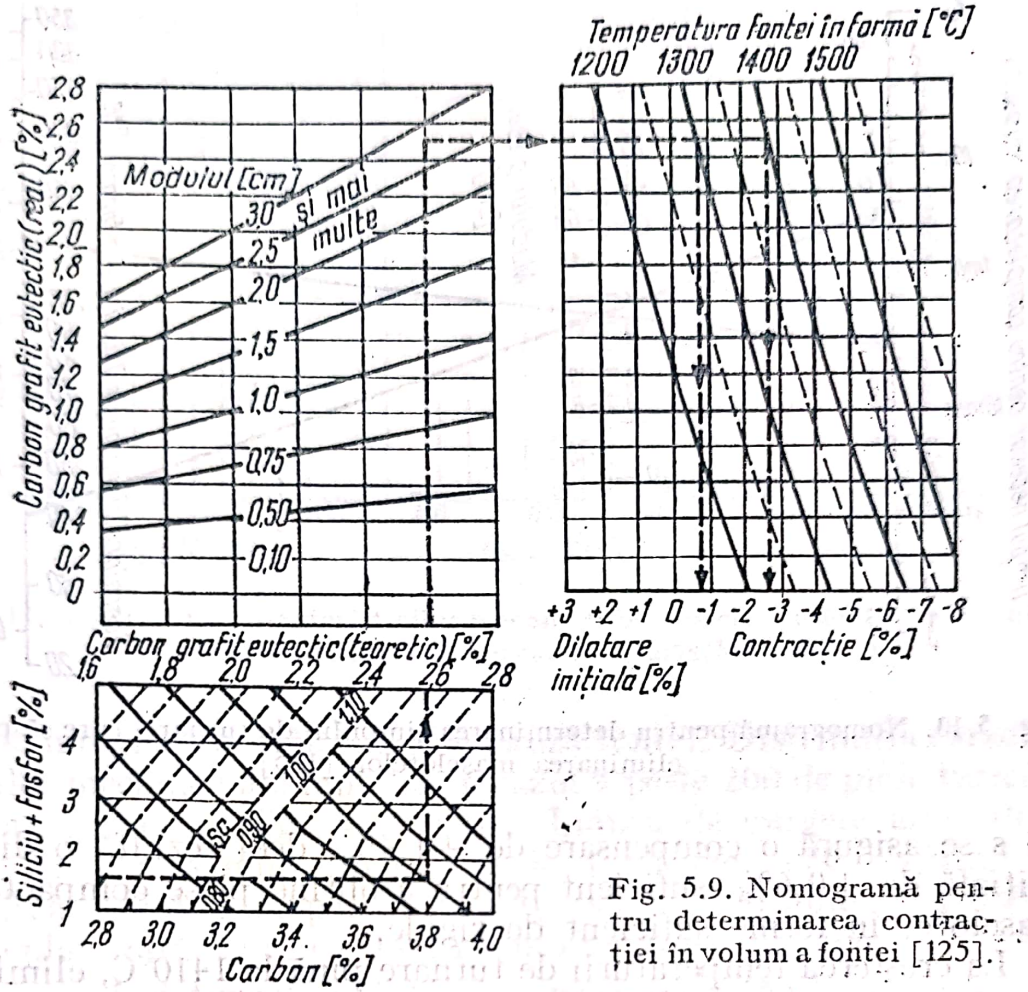


Fig. 5.9. Nomogramă pentru determinarea contracției în volum a fontei [125].

Secțiunea totală a alimentatoarelor se calculează cu relația [124]:

$$n \cdot S_A = \frac{22{,}6 \cdot G}{\rho \, t \, \varepsilon \sqrt{h}} = \frac{22{,}6 \cdot 512}{7{,}48 \cdot 0{,}38 \sqrt{36}} = 15{,}2 \text{ cm}^2. \qquad (5.2)$$

În fig. 5.9 este prezentată o nomogramă pentru determinarea contracției la solidificare a pieselor în funcție de compoziția chimică, temperatura de turnare și viteza de răcire [125]. Pe nomogramă, în cazul unei grosimi de perete de 8,5 cm și modul de răcire 2,7 cm, rezultă o contracție de 0,8%.

Modulul de răcire pentru o piesă sub formă de bară ($a = 8{,}5$ cm; $b = 15$ cm)

$$Z = \frac{a\,b}{2\,(a+b)} = 2{,}7 \text{ cm}. \qquad (5.3)$$

Retasura din piesele turnate poate fi eliminată dacă se asigură o completare cu lichid a golurilor de contracție formate, conform datelor din fig. 5.10 [125].

O contracție de volum de 0,8%, la un modul de 2,7 cm, se echilibrează la un timp de turnare de 22 s. La o durată de turnare de

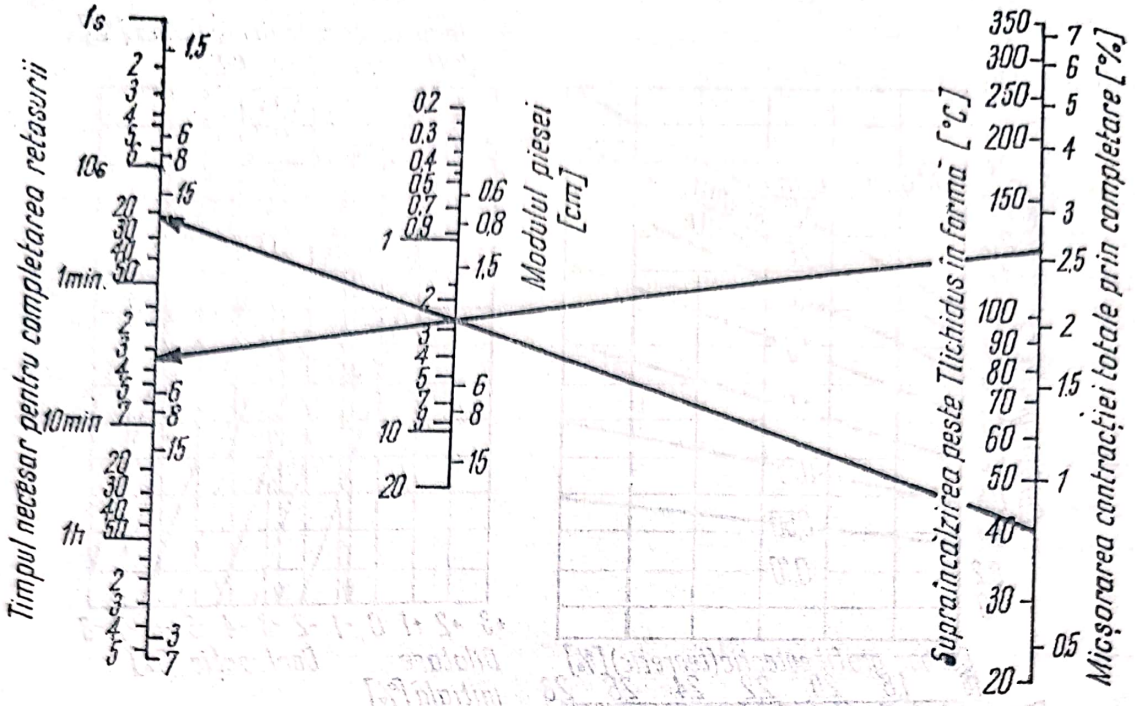


Fig. 5.10. Nomogramă pentru determinarea timpului de turnare, care să permită eliminarea maselotelor [125].

48 s se asigură o compensare de +1,4%, deci rezultă o dilatare inițială de +0,6%, suficient pentru a obține piese compacte fără maselote, în forme suficient de rigide.

La creșterea temperaturii de turnare pînă la 1410°C, eliminarea maselotei este imposibilă, deoarece contracția la o durată totală de turnare de 48 s este, așa cum rezultă din fig. 5.9 și fig. 5.10 —2,7% + 1,4% = —1,3%.

Pentru compensarea contracției de 2,7% și preîntîmpinarea formării retasurii ar fi necesar un timp de turnare de 200 s, ceea ce practic este imposibil. Pentru piese de 500 kg (modul 2,7 cm), la contracții de 2%, se utilizează maselote de ∅180 × 270 mm, de 38 kg. La contracții de 1,0% maselotele se reduc la ∅150 × × 225 mm.

Chiulase din fontă cu grafit vermicular pentru motoarele Diesel de mare putere sînt prezentate de către [300]. Fontele modificate cu Ce-MM au compoziția chimică: 3,31...3,47%C, 2,37...2,58%Si, 0,13...0,15%Mn, 0,06...0,08%P, 0,005%S, 0,016...0,025%Ce, fiind turnate în chiulase de 500 kg, cu grosimea de 20...120 mm [300].

A fost utilizată aceeași garnitură de model ca și în cazul fontelor cu grafit lamelar, turnarea avînd loc în forma de amestec pe bază de rășini, cu întărire la rece. La un coeficient de scoatere de 75% au fost obținute următoarele caracteristici mecanice, R_m = 316...356 N/mm², $R_{0,2}$ = 252...285 N/mm², A = 5,6... ...6,5% și HB = 138...148. Nu au fost constatate retasuri și porozități în piesele turnate, iar timp de mai multe săptămîni nu

Scanned with OKEN Scanner

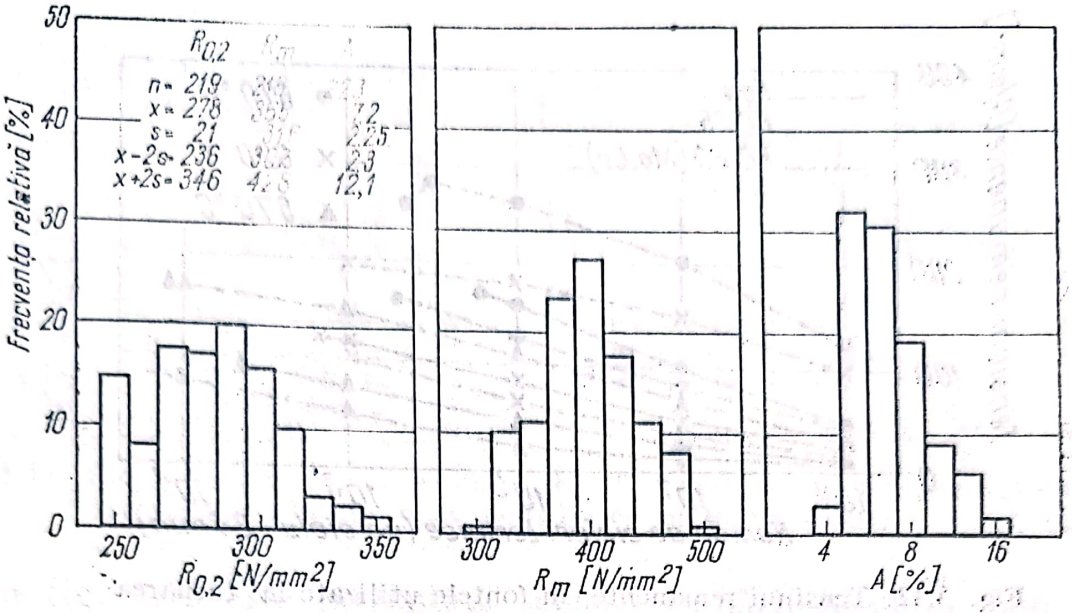


Fig. 5.11. Distribuția caracteristicilor mecanice ale fontelor cu grafit vermicular feritice utilizate la turnarea chiulaselor [300].

au fost înregistrate rebuturi din cauza fontei. Distribuția caracteristicilor mecanice ale fontelor în cazul a peste 200 de piese turnate este prezentată în fig. 5.11 [300]. Limita de curgere are valori medii de 278 N/mm², rezistența la tracțiune — 365 N/mm² și alungirea — 7,2%. Raportul $R_{0,2}/R_m$ este 0,76 la fontele cu grafit vermicular, față de circa 0,6 la fonta cu grafit nodular.

Au mai fost turnate chiulase cu masa de la 185 kg la 1400 kg, care s-au comportat bine în exploatare. Astfel, în cazul utilizării fontelor cu grafit vermicular, puterea motoarelor Diesel a fost mărită cu 30% în comparație cu utilizarea fontelor cu grafit lamelar aliate (Fc 300). Încercările motoarelor la creșteri ale puterii cu pînă la 80% nu au condus la apariția de fisuri din cauza tensiunilor termice și mecanice [300].

Analizînd condițiile de elaborare a fontelor sintetice, în cuptoarele cu inducție, în vederea turnării chiulaselor se recomandă utilizarea carburii de siliciu pentru dezoxidare și rafinare [55]. Se recomandă fonte cu grafit lamelar cu 3,4...3,5%C și 1,85... ...2,25%Si, aliate cu 0,25%Cr și 0,35%Mo, încadrate în marca Fc300 sau fonte cu grafit vermicular. La mărirea duratei de solicitare la șoc termic crește valoarea tensiunilor remanente acumulate de fonte (fig. 5.12).

Chiulase din fontă cu grafit vermicular, obținută prin modificarea cu 1,0...1,3% FeSiCaTiMg, sînt produse și în SUA [268].

Pînă în anul 1982 o turnătorie avea în exploatare peste 10 000 chiulase la motoare Diesel, în multe cazuri pe vapoare de mare tonaj: Fregata „Hamburger Fleet" (motor 8M551), vaporul de pasageri

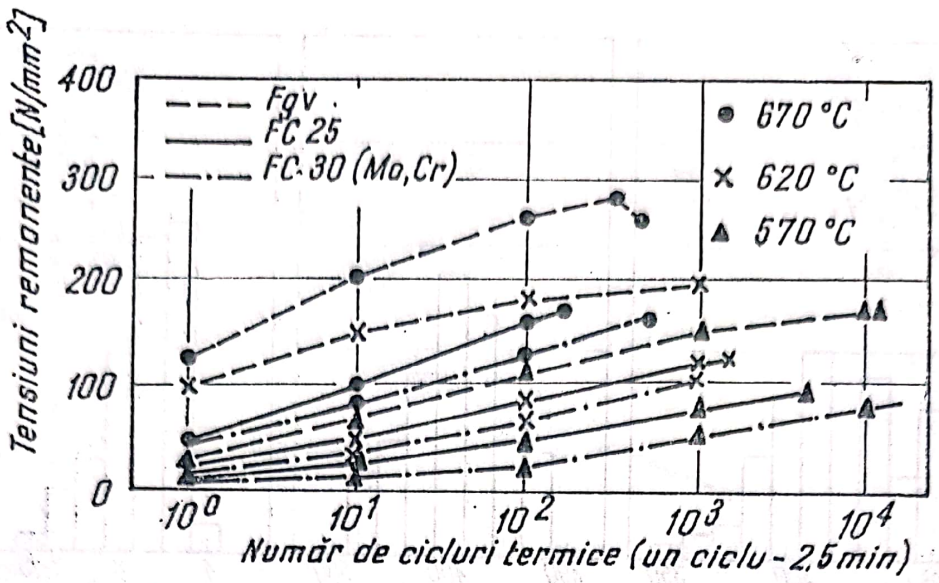


Fig. 5.12. Tensiuni remanente, în fontele utilizate la turnarea chiulaselor [55].

„Golden Odysee" (motoare 4×8M282+2×12M551), spărgătorul de gheață „Schepelstum" (motoare 2×8M551 AK) [253].

În Japonia se produc chiulase pentru motoare Diesel de mică putere pentru echipament electric (100 kg, 8...50 mm) [253].

Se produc chiulase pînă la 2000 kg ($L \times D \times H = 1200 \times 750$ mm, 20...70 mm grosime) ca și chiulase pentru motoarele TM 620, cu 1360 kW/cilindru, 19 bari, ∅ 20 mm [253]. Astfel de piese se produc și în R.P. Chineză [463].

Pentru turnarea blocului motor din mașinile TATRA (motor T-815) s-a renunțat la utilizarea fontelor cu grafit lamelar, datorită fisurilor ce apăreau între cilindri și s-a trecut la folosirea fontelor cu grafit vermicular, obținute prin modificarea în formă- [430]. Fontele sînt elaborate în sistemul duplex cubilou-cuptor cu inducție, cu o desulfurare în oale cu dop poros, cu 1% CaC_2, înainte de turnarea în cuptorul cu inducție. După o desulfurare de 15...20 min, sulful scade de la 0,064...0,083% pînă la 0,030... ...0,045%.

Modificarea a fost realizată cu 0,6...1,2% modificator LITVAR 8 (7% Mg, 48%Si), cu o granulație de 5...8 mm, la o temperatură de turnare în formă de 1380...1410°C. Fontele cu compoziția chimică 3,23...3,60%C, 0,61...0,86%Mn, 1,35...1,60%Si, 0,16...0,2%P, 0,021...0,026%S, 0,020...0,028%Mg, $S_c = 0,85...1,0$ au în piesele turnate următoarele caracteristici: $R_m = 247...300$ N/mm², $A = 2,7...3,4\%$.

Se recomandă ca înainte de modificare fontele să conțină 0,02... ...0,03%S, astfel că este suficient pentru a obține grafit vermicular 0,6% modificator la $\eta_{Mg} = 50...60\%$.

Scanned with OKEN Scanner

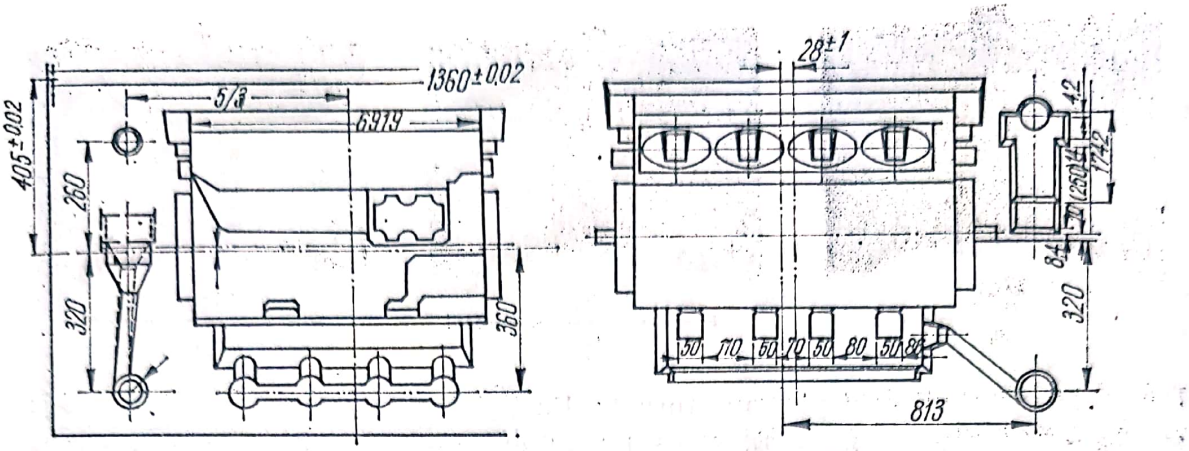


Fig. 5.13. Bloc cilindrii pentru motorul TATRA (T-815) din fontă cu grafit vermicular, obținut prin modificarea în formă [430].

În fig. 5.13 este prezentată schema turnării blocului motor prin modificarea în formă, la următorii parametrii: $G = 250$ kg; $\tau_t = 40$ s; $\upsilon_t = 6{,}25$ kg/s. Camera de reacție are secțiunea $S = 100 \times 175$ mm, iar factorul de dizolvare $F = v_t/S = 0{,}035$ kg/cm² s la limita inferioară a domeniului general de utilizare. În ceea ce privește rețeaua de turnare, se recomandă raportul:

$$F_{al} : F_{zg} : F_{pp} = 1{,}0 : 1{,}1 : 1{,}3. \qquad (5.4)$$

Tot în Cehoslovacia, pentru turnarea blocului cilindrilor, ca și a chiulaselor motoarelor cu ardere internă, se utilizează fonte cu grafit vermicular obținute prin modificarea în oală, cu 0,1...0,2% MM (49,50%Ce; 47,80%PR; 0,04%Fe; 0,14%Si, 0,1%Al) sau cu Sofrem (20,6%Ce; 21,65%PR; 12,0%Fe; 40,35%Si, 2,60%Ca). Fontele cu grafit vermicular cu compoziția 3,3...3,4%C; 2,9...3,1%Si, 0,10%Mn, 0,07%P, 0,001%S sînt obținute din fontă de înaltă puritate (MAG) sau fonte de afinare. Se recomandă utilizarea fontelor de înaltă puritate, pentru a asigura o tenacitate și plasticitate ridicată [331].

Preocupări pentru producerea de chiulase și bloc motor din Fgv există în prezent și la I. A. Brașov.

5.2.2. Pistoane

Analizînd perspectivele utilizării diferitelor materiale, pentru turnarea pistoanelor, destinate motoarelor Diesel se remarcă trei grupe de aliaje [284]:

— aliajele de aluminiu;
— fonte cu diferite forme de grafit;
— oțel de construcție de înaltă rezistență.

Se consideră că fontele cu grafit vermicular prezintă o perspectivă deosebită pentru fabricarea pistoanelor.

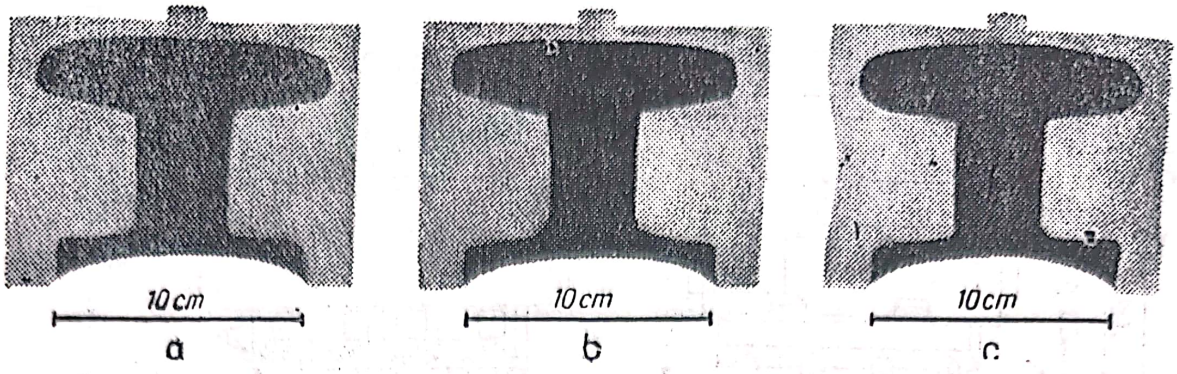


Fig. 5.14. Secțiuni prin pistoane turnate din Fgl (*a*), Fgn (*b*) și Fgv (*c*) [353]: *a* — R_m = 307 N/mm²; *b* — R_m = 397 N/mm² și A = 17,9%; *c* — R_m = 359 N/mm² și A = 5%

Utilizarea fontelor cu grafit vermicular este deosebit de avantajoasă în cazul pieselor la care se preîntîmpină cu greu formarea retasurii, cum ar fi pistoanele. În fig. 5.14 sînt prezentate secțiunile prin pistoane turnate din fonte cu grafit lamelar, vermicular și nodular, fără maselotare [353].

Pistoanele turnate din fontă cu grafit lamelar nu au retasuri sau defecte superficiale. În cazul utilizării fontelor cu grafit nodular se constată apariția retasurilor și deformării (umflării) suprafețelor cilindrice. În cazul fontelor cu grafit vermicular nu au fost constatate retasuri și doar în unele cazuri suprafețele interioare au prezentat deformări. Această comportare este datorată faptului că Fgv au tendința de formare a retasurilor cu mult scăzută în raport cu Fgn, fiind doar în mică măsură mai accentuată decît la Fgl.

5.2.3. Segmenți de piston

S-a stabilit o tehnologie de fabricare a segmenților de piston din fonte cu grafit vermicular [190, 191].

Pornind de la o încărcătură formată din deșeuri de fontă cu grafit vermicular și fontă de primă fuziune au fost obținute fonte cu grafit vermicular prin modificarea, la 1460...1490°C, cu Ce MM (49%Ce), după o supraîncălzire la 1530...1540°C. Fontele au fost turnate la 1400...1430°C în bucșe din care se prelucrează segmenții sau direct în segmenți, în ciorchine (fig. 5.15). Avînd în vedere grosimea de perete redusă, tendința de formare a grafitului nodular și de apariție a cementitei libere este ridicată.

În vederea obținerii grafitului vermicular, la grosimi de peste 10 mm, se recomandă %CeMM/%S = 6...18, în timp ce la grosimi sub 10 mm, raportul %CeMM/%S < 10. De exemplu,

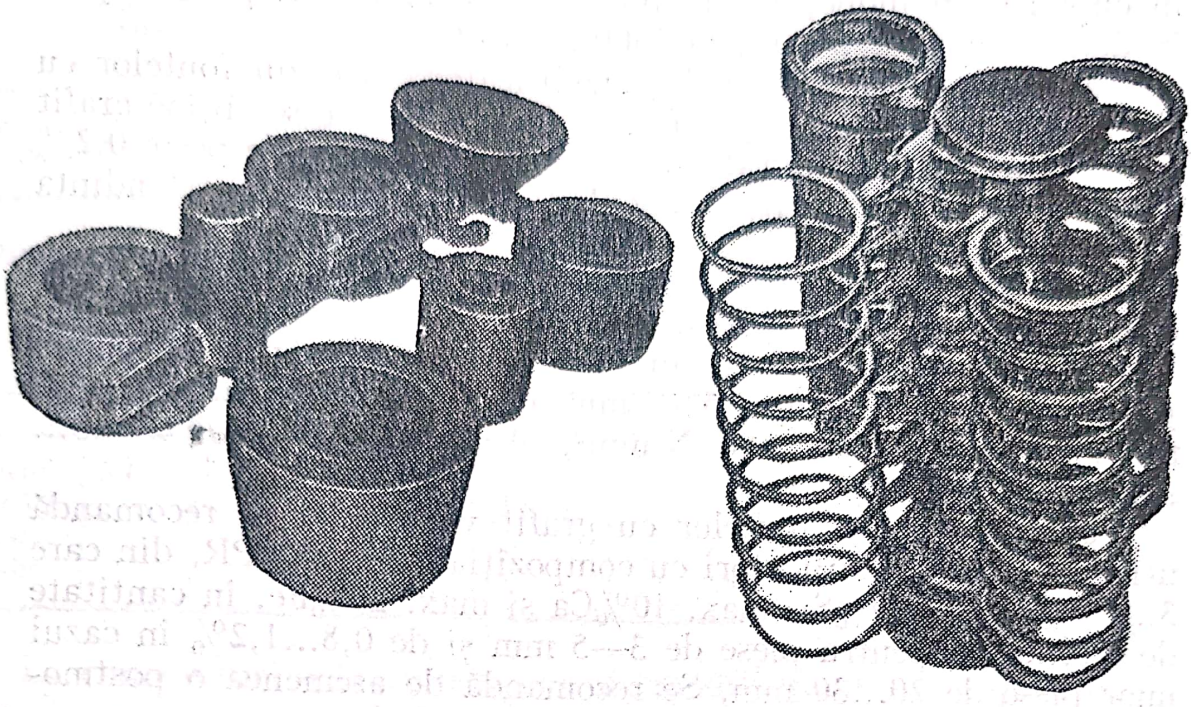


Fig. 5.15. Bucșe turnate pentru prelucrarea segmenților (*a*) și segmenți turnați individual (*b*) din fonte cu grafit vermicular [191].

la grosimi de 12 mm la un conținut de 0,016...0,02%S se utilizează 0,14...0,28%CeMM.

Alierea fontei cu 0,7%Mn, 0,2%Sb, 0,2%Cu a condus la mărirea proporției de perlită, care nu a depășit însă 60%. Conținuturi de peste 90%P au fost obținute prin normaliazre, în urma încălzirii 2h la 900°C și răcire în aer.

Fontele cu grafit vermicular cu 3,40...3,80%C, 2,23...2,75%Si, 0,43...0,70%Mn, 0,03...0,04%P, 0,016...0,034%S, obținute în urma modificării cu 0,13...0,20%Ce-MM, au $R_m = 333...515$ N/mm², $A = 1,72...8,57\%$ și $E = 160\,451...172\,931$ N/mm².

Turnarea unor segmenți de piston din fonte modificate cu ceriu este semnalată și de către lucrarea [224]. În cazul unor fonte cu 3,6...3,8%C, 1,0...3,5%Si, 0,4...0,7%Mn, 0,1...0,2%Cr, max. 0,02%S și max. 0,05%P, modificarea cu 0,05...1,0% modificator (29...30%PR, 52%Si, 3%Al+Ca, Fe-rest) a determinat obținerea mai multor forme de grafit (tabelul 5.9) [224].

Modificarea a avut loc în jet, la evacuarea fontei în oală sau

Tabelul 5.9

FONTE MODIFICATE CU Si–Y–MM [224]

Diametrul probei mm	Consum modificator %	Tipul grafitului
4	⩾0,3	Gv + Gn
12	0,4	Gv
	0,8	Gn
30	0,3...0,6	Gv + Gl
	⩾0,8	Gv + Gn

Scanned with OKEN Scanner

în cuptorul cu inducție, cu ajutorul unui clopot după o supraîncălzire, timp de 5 min, la 1500...1510°C.

La utilizarea a 0,05...0,2% modificator, în cazul fontelor cu $Sa \leqslant 1{,}0$ și a 0,05...0,4% la fontele hipereutectice se obține grafit lamelar fin, iar tendința de albire scade. La valori de peste 0,2% modificator apare grafit vermicular, dar se mărește și tendința de albire a fontei.

Grosimea de perete și consumul de modificator influențează direct tipul grafitului [224].

Din fontele modificate au fost turnați segmenți de piston ∅144 mm, cu secțiunea 4,5 ×7 mm, cu următoarele caracteristici mecanice: $R_m = 570...680$ N/mm², $A = 2{,}2...4{,}3\%$, $K = 1{,}5...$ ...2,2 daj/cm².

Pentru obținerea fontelor cu grafit vermicular se recomandă utilizarea unor modificatori cu compoziția: 25...35%PR, din care 3...20%Y, 50...60%Si, max. 10%Ca și max. 20%Fe, în cantitate de 0,3...0,4% pentru piese de 3—5 mm și de 0,8...1,2% în cazul unor piese de 20...30 mm. Se recomandă de asemenea o postmodificare cu FeSi75.

Utilizarea fontelor cu grafit vermicular la turnarea segmenților motoarelor tip „D50" este semnalată în lucrarea [40]. Se remarcă faptul că la fontele cu grafit vermicular se creează microcanale, care asigură un regim optim de ungere, în comparație cu fontele cu grafit lamelar și nodular.

5.2.4. Corpuri de turbocompresor

În U.R.S.S. se produc corpuri de turbocompresoare de diferite tipuri, de 170...350 kg, de configurație complexă, cu grosimi de perete variind în limitele 10...65 mm [4]. Fontele cu max. 0,02%S sînt modificate, în cantități de 5,0...7,0 t, cu 0,5...0,7% Siitmiș 1, la temperatura 1480—1520°C, elaborarea avînd loc în cuptoare cu arc. Modificatorul este adăugat la baza oalei iar postmodificarea se face cu 1,0...1,2%FeSi75, la 6...10 min de la modificare, la temperatura de 1390...1400°C. Caracteristicile fontelor cu grafit vermicular obținute sînt prezentate în tabelul 5.10.

Analiza pieselor turnate arată faptul că în cazul fontelor cu grafit vermicular se obține o compactitate mai mare decît la fontele cu grafit lamelar aliate cu Ni sau Ni-Cr-Mo, pe care le înlocuiesc.

Efectul economic obținut prin eliminarea elementelor de aliere (Ni, Mo) este de 15...20 ruble/t. Avînd în vedere faptul că rezistența fontelor cu grafit vermicular este de 1,5...1,8 ori mai mare decît cea a fontelor cu grafit lamelar apare posibilitatea reducerii greutății pieselor [4].

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.10

CARACTERISTICILE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR PENTRU TURBOCOMPRESOARE [4]

Caracteristica	Compoziția chimică, %						Structura	R_m daN/mm²	A %	HB
	C	Si	Mn	P	S	P.R.				
Impus	3,3—4,0	2,0—3,0	0,5—1,2	Max. 0,1	Max. 0,01	0,10—0,15	Gv (max. 30% Gn) 0...30 % P	38	1,5	170 . . . 241
Obținut (media a 20 probe)	3,64	2,68	1,10	Max. 0,07	Max. 0,007	0,13	Gv+ 20% Gn 20% P	44±5	3,5± 2	160—228

La conținuturi scăzute de elemente modificatoare, la suprafața pieselor apare un strat de 0,2...0,6 mm în care grafitul este lamelar, datorită oxidării elementelor din grupa pămînturilor rare, în special la temperatura de turnare de peste 1380°C. La cantități suficiente de elemente modificatoare și la temperaturi de turnare mai scăzute, grafitul lamelar nu mai apare.

5.2.5. Colectoare de gaze

O turnătorie toarnă din fontă cu grafit vermicular colectoare de gaze cu grosimea de perete de 2,5 mm, cu următoarele caracteristici: $R_m = 430$ N/mm², $A = 3{,}6\%$, $HB = 174...196$ [297, 447].

Fontele cu 3,35%C, 2,26%Si, 0,28%Cr sînt modificate cu FeSiCaMgCeAlBa și postmodificate cu 0,10%FeSi75, astfel că la grosimi de perete de 2,5 mm nu prezintă cementită liberă. Piesele turnate sînt dezbătute după 10—15 min de la turnare. Aceste piese au cost mai redus decît în cazul turnării lor din fontă cu grafit lamelar, datorită reducerii grosimii de perete, a energiei consumate la fabricare, a creșterii performanțelor mecanice.

Colectoare de evacuare a gazelor la motoarele Diesel, din fontă cu grafit vermicular, produce și o altă turnătorie [25].

Analizînd domeniile de utilizare a fontelor cu grafit vermicular, se indică posibilitatea folosirii lor la turnarea colectoarelor de distribuție a gazelor la motoarele de automobile [204]. Colectoare de gaze din Fgv se produc și în R.P. Chineză [463].

În fig. 5.16 sînt prezentate colectoare de gaze, obținute prin modificarea în oală (5.16, *a*) și în formă (5.16, *b*) [253].

Scanned with OKEN Scanner

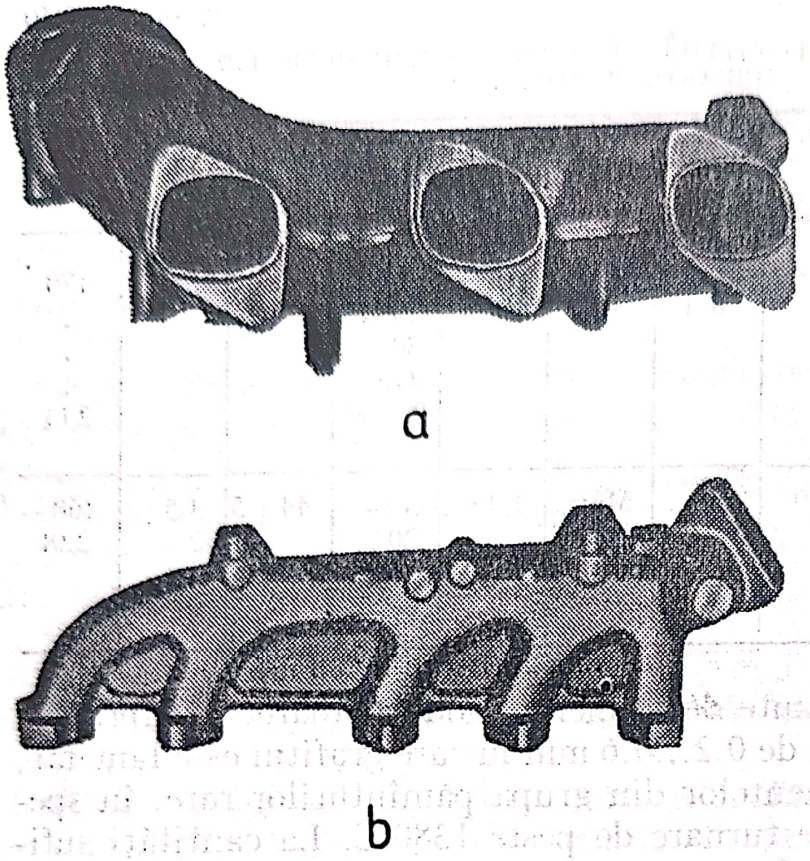


Fig. 5.16. Colectoare de gaze [253].

5.2.6. Volante pentru automobile

Se produc, din fontă cu grafit vermicular, volanți pentru motoarele de automobile [268]. Fontele modificate cu 1,0...1,3% modificator FeSiCaMgCeTi (4...5%Mg; 8,5...10,5Ti, 0,2...0,36%Ce, 4...5,5%Ca; 1...1,5%Al; 48...52%Si, rest Fe) au compoziția chimică: 3,5%C, 1,7%Si, 0,3%Mn, max. 0,1%P, max. 0,012%S, max. 0,25%Cu, 0,0026...0,025%Mg, 0,02...0,06%Ti.

În stare turnată piesele conțin max. 20%Gn, la o masă metalică perlitică (max. 20%F) cu 5% carburi.

Același tip de piese sînt turnate și de către alte întreprinderi care utilizează tot modificatori din sistemul FeSiCaMgTiCe [25].

5.3. Alte piese pentru construcția de mașini

Firma „Steyer-Daimler-Puch AG"—Austria produce piese din fontă cu grafit vermicular pentru automobile și tractoare din anul 1966: distanțiere (13,5 kg), piese de legătură (1,8 kg și 2 kg), roți

Scanned with OKEN Scanner

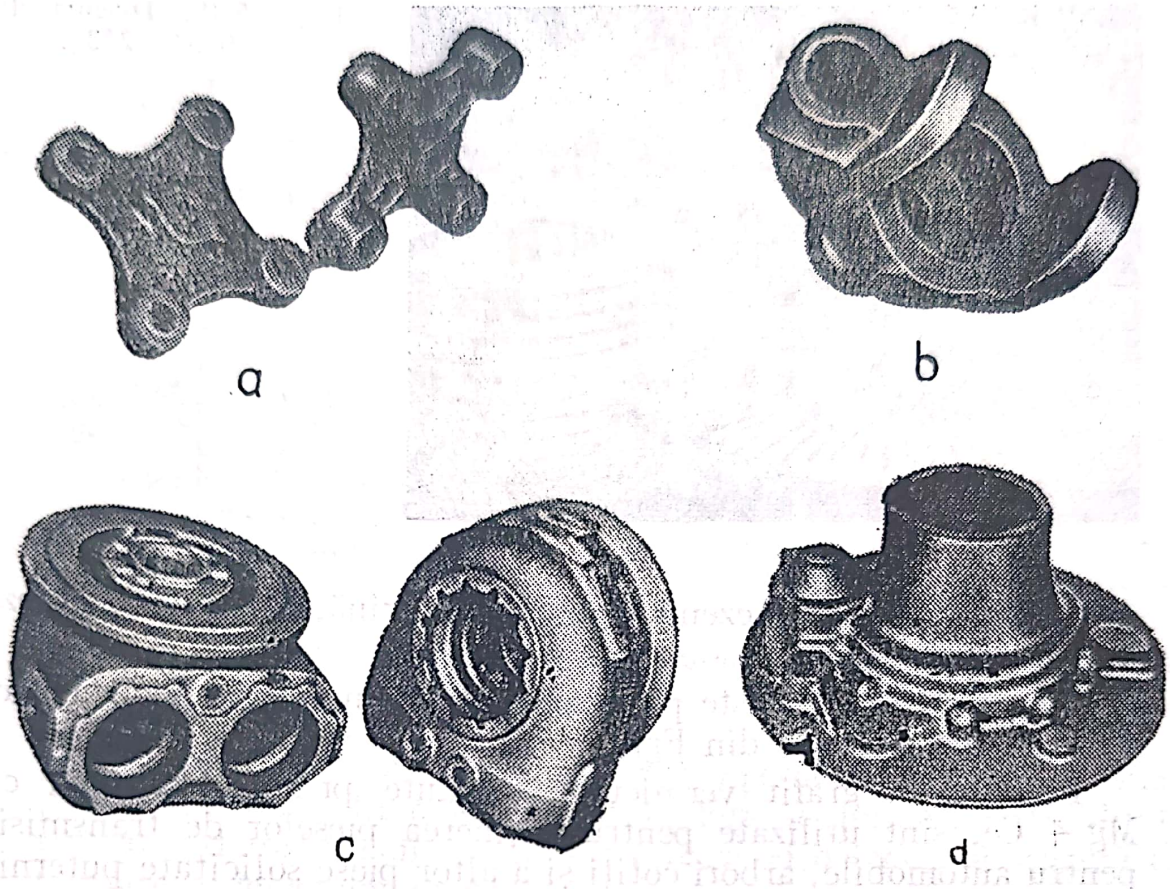


Fig. 5.17. Piese pentru automobile și tractoare din fontă cu grafit vermicular produse de diferite firme [253]:

a — piese de legătură (1,8 kg și 2 kg); *b* — pinion (2,8 kg); *c* corp de pompă; *d* — capac de cutie de viteză.

de lanț (1,8 kg și 1,15 kg), saboți (8,2 kg), pinion (2,8 kg), console (2,85 kg și 5,7 kg) pîrghii (1,1 kg și 1,77 kg). Asemenea piese mai produc și alte firme: corp pompă, carcase de diferențial (12,9; 7,3 și 22,4 kg) capace de cutii de viteză, rotor (40 kg), saboți (1,5 kg), bloc-motor (40 kg), angrenaj (17 kg), la început cu grosimi de perete 5...20 mm, cu o extindere ulterioară pînă la 50 mm și chiar mai mult [253, 353]. În fig. 5,17 sînt prezentate cîteva piese tipice turnate din fontă cu grafit vermicular. Fonta este elaborată în cuptoare cu inducție pe bază de deșeuri de oțel, desulfurate cu carbură de calciu pînă la 0,008%S (fig. 5.17, *a*, *b*). Modificarea a avut loc cu 0,10%Ce-MM, iar postmodificarea cu FeSi75. Firma producătoare anunță realizarea unui cost de producție cu 20% mai scăzut decît în cazul fontei maleabile și cu 30% față de fonta cu grafit nodular [353].

Într-o serie de alte lucrări fontele cu grafit vermicular se recomandă pentru turnarea tamburelor de frînă [278, 333], a pinioanelor [204], considerîndu-se că acest tip de fontă constituie un material de mare perspectivă pentru construcția de automobile și tractoare [74, 149, 293, 332, 353].

Scanned with OKEN Scanner

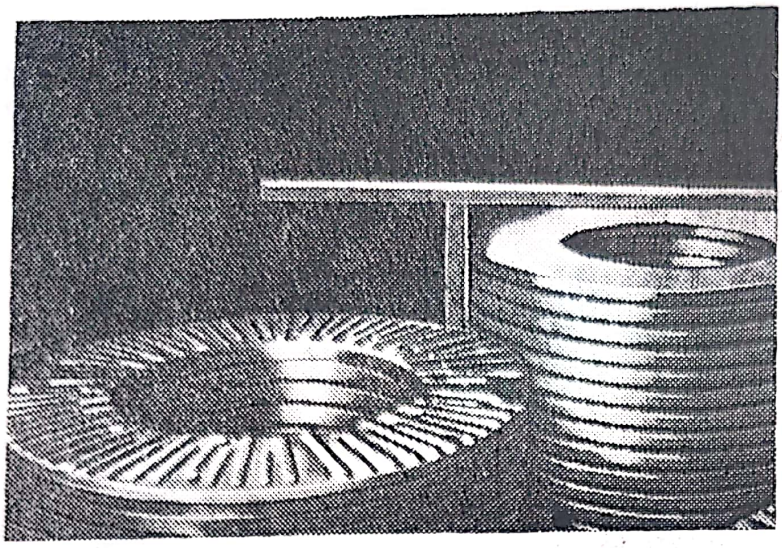


Fig. 5.18. Discuri de frînă [253].

În fig. 5.18 sînt prezentate discuri de frînă, utilizate la viteze de 200 km/h [253].

Se consideră că aceste piese se comportă mai bine decît atunci cînd au fost turnate din Fgn.

Fontele cu grafit vermicular obținute prin modificarea cu Mg + Ce, sînt utilizate pentru obținerea pieselor de transmisie pentru automobile, arbori cotiți și a altor piese solicitate puternic mecanic [459].

5.4. **Hidroaparatură**

Tendința scăzută de formare a defectelor de turnare (microretasuri, porozitate, incluziuni), precum și caracteristicile specifice ale grafitului vermicular asigură acestor fonte o compactitate ridicată, o etanșeitate corespunzătoare în condiții de presiune de sute de atmosfere.

În R.S. Cehoslovacă din fontă cu grafit vermicular au fost produse regulatoare hidraulice [22]. Vechea tehnologie prevedea obținerea acestora din fontă cu grafit lamelar, din mai multe bucăți, urmînd apoi asamblarea. În cazul utilizării fontelor cu grafit lamelar nu se garanta rezistența la presiuni ridicate, în timp ce fonta cu grafit nodular, deși asigură proprietăți mecanice corespunzătoare, ridică o serie de probleme din punctul de vedere al proprietăților de turnare. Fontele cu grafit vermicular asigură condițiile impuse acestor piese: rezistență ridicată la solicitări statice și dinamice, stabilitate structurală, dimensională și a pro-

Scanned with OKEN Scanner

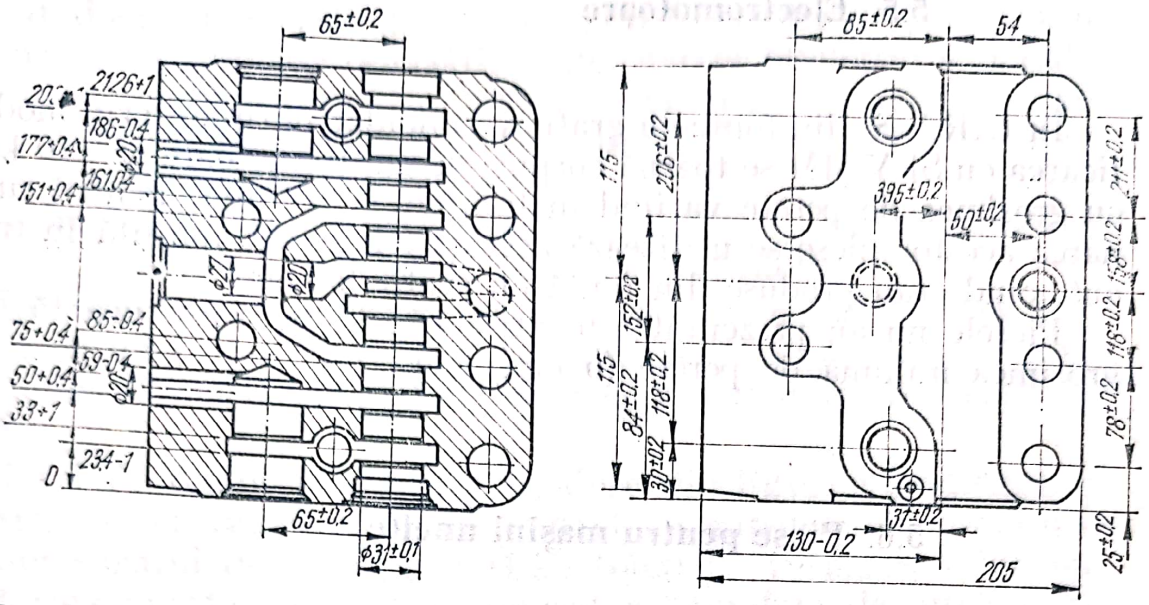


Fig. 5.19. Regulator hidraulic tip PRS20P turnat din fontă cu grafit vermicular [22].

prietăților mecanice, rezistență la temperaturi ridicate, o bună prelucrabilitate. În mod special la Fgv se impune o fluiditate ridicată, datorită configurației complexe și o tendință scăzută de formare a defectelor de contracție.

În fig. 5.19 este prezentat regulatorul „PRS-20P" turnat din fontă cu grafit vermicular [22].

Fontele au fost elaborate în cuptoare cu inducție, pornind de la deșeuri de fontă obținute într-un cuptor cu arc și ca fonte sintetice.

Modificarea fontei se realizează cu pământuri rare adăugate în jetul de fontă, la 1420...1450°C, iar postmodificarea cu FeSi75. Turnarea a avut loc la 1320°C.

Analiza comportării în exploatare a patru tipuri de regulatoare hidraulice turnate din fontă cu grafit vermicular a condus la evidențierea superiorității acestora:

— nu au prezentat defecte de contracție;

— stabilitatea dimensională este superioară celor turnate din Fgl sau Fgn;

— stabilitate structurală ridicată la variația grosimii de perete; utilizarea fontelor cu grafit vermicular pentru turnarea ventilelor hidraulice este semnalată și în cadrul lucrărilor [258, 333].

În S.U.A. fonta cu grafit vermicular este utilizată pentru turnarea corpurilor de pompe, valvulelor, conductelor de presiune [463]. Valvule se produc și în R.P. Chineză [463].

La I.M. Bacău se produc armături din Fgv [92].

Preocupări pentru asimilarea Fgv pentru piese ce lucrează la presiune, există și la I.C.N.P.T. Oltenița.

Scanned with OKEN Scanner

5.5. Electromotoare

În U.R.S.S. din fonte cu grafit vermicular obținute prin modificarea cu Si-Y-MM se toarnă corpuri de electromotoare de 110 kg, cu grosimea de perete variind în limitele 6...25 mm. Pentru turnarea acestor piese se utilizează aceeași tehnologie folosită în trecut, cînd erau produse din fontă cu grafit lamelar.

Piesele nu au prezentat cementită liberă, în stare turnată, la grosimea minimă de perete (6 mm) [2].

5.6. Piese pentru mașini unelte

Capacitatea de amortizare a vibrațiilor ridicate, mai mare decît cea a fontelor cu grafit nodular precum și superioritatea, din punctul de vedere al rezistenței și alungirii, în raport cu fontele cu grafit lamelar, conferă fontelor cu grafit vermicular argumente serioase în vederea utilizării lor la turnarea diferitelor piese ce intră în componența mașinilor unelte.

Sensibilitatea ridicată, la apariția feritei în structura în stare turnată, respectiv duritatea scăzută constituie probleme a căror rezolvare se impune, pentru a asigura condiții de exploatare corespunzătoare mașinilor unelte. O cantitate ridicată de perlită în structură, care să asigure o rezistență la uzare corespunzătoare, poate fi realizată cu ajutorul elementelor de aliere (Cu, Sn, Cr), în condiții apropiate de cele utilizate în mod frecvent la fontele cu grafit lamelar.

Despre utilizarea fontelor cu grafit vermicular în construcția de mașini unelte sînt cunoscute puține date.

În U.R.S.S., din acest tip de fonte au fost turnate batiuri cu greutatea 110...700 kg și grosimi de perete de 30...100 mm, cu o comportare bună în exploatare [2].

5.7. Alte domenii de utilizare

O întreprindere produce, din 1974, *matrițe de forjare* a oțelului din fontă cu grafit vermicular. Controlul modificării este realizat cu ajutorul ultrasunetelor, prin care piesele din fontă cu grafit vermicular sînt separate de cele cu grafit lamelar [278].

Scanned with OKEN Scanner

Formele metalice pentru turnarea obiectelor din *sticlă* constituie un alt domeniu în care fontele cu grafit vermicular pot avea o comportare superioară celorlalte fonte. Aceste piese sînt solicitate la încălziri și răciri repetate, precum și la un proces intens de oxidare, scoaterea lor din uz fiind determinată de către formarea unor rețele de oxizi și a crăpăturilor.

Tehnologiile clasice prevăd folosirea fontelor cu grafit lamelar, turnate pe răcitor, în vederea finisării grafitului.

În cazul unor fonte elaborate în cuptoare cu inducție, modificarea cu 0,05...0,10%CeMM și turnarea pe răcitor a permis obținerea unor forme metalice cu o bună comportare în industria sticlei. [258].

La I.P. București au fost produse din Fgv, cu modificatori Fe Si Ca Al Ti Mg, *forme metalice* pentru componentele motorului compresorului de la frigider (I.F. Găești), turnarea avînd loc în forme vidate, ceea ce a asigurat o suprafață de bună calitate (rugozitate scăzută). A fost posibilă, de asemenea, înlăturarea, în mare parte, a operațiilor de prelucrare mecanică, fiind obținută direct din turnare o configurație apropiată de cea finală.

6. TRATAMENTE TERMICE APLICATE PIESELOR DIN FONTĂ CU GRAFIT VERMICULAR

La Fgv se aplică tratamentul termic de *recoacere* grafitizantă în vederea eliminării cementitei libere din piesele cu pereți subțiri sau asigurării unei structuri complet feritice, precum și tratamentul termic de *normalizare*, în vederea măririi proporției de perlită.

Pe baza unor studii dilatometrice se scot în evidență particularitățile dilatării austenitice, în cazul încălzirii la 800...900°C a unor fonte feritice, cu diferite forme de grafit [435].

În tabelul 6.1 este prezentată compoziția chimică a fontelor, iar în fig. 6.1 influența siliciului, a temperaturii de încălzire și a formei grafitului asupra dilatării fontelor feritice, în timpul austenitizării [435].

Tabelul 6.1

COMPOZIȚIA CHIMICĂ A FONTELOR FERITICE SUPUSE AUSTENITIZĂRII [435]

Tipul fontei	Numărul probei	Compoziția chimică, %					
		C	Si	Mn	P	S	Mg
Fgn	1	3,43	1,58	0,12	0,043	0,004	0,073
	2	3,42	1,89	0,16	0,058	0,005	0,058
	3	3,47	2,16	0,44	0,082	0,006	0,033
	4	3,46	2,49	0,59	0,067	0,017	0,061
	5	3,45	2,85	0,20	0,020	0,008	0,040
Fm	6	2,40	1,22	0,37	0,10	0,13	—
Fgv	7	3,51	2,58	0,18	0,049	0,015	0,016
Fgl	8	3,49	2,12	0,15	0,059	0,019	—

Dilatarea la transformarea austenitică se datorește dizolvării carbonului în austenită, fiind proporțională cu diferența între conținutul maxim de carbon al austenitei și conținutul de carbon dizolvat în austenită cînd volumul specific al acesteia este egal cu cel al feritei.

Dilatarea austenitică crește odată cu micșorarea conținutului de siliciu al fontei și cu valorile temperaturii de încălzire. De

Scanned with OKEN Scanner

asemenea, a fost constatată o mărire a dilatării odată cu creșterea gradului de compactitate a grafitului. Grafitul determină o porozitate a austenitei, spațiul liber dintre separările de grafit și masa metalică fiind mai mare la fontele cu grafit nodular, în raport cu fontele cu grafit vermicular și lamelar. Rezultă deci că dilatarea din timpul austenitizării fontei se datorește atît creșterii de volum a masei metalice, cît și generării de spații goale între separările de grafit și masa metalică [435].

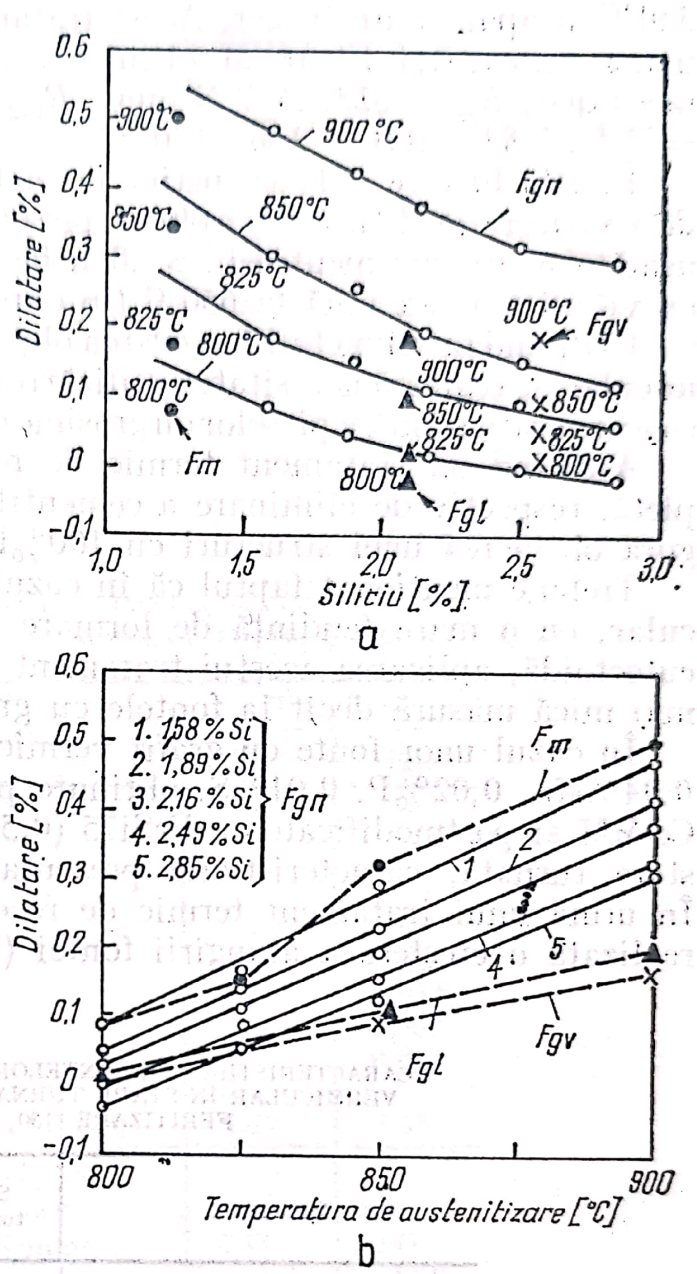


Fig. 6.1. Influența siliciului (*a*) și a temperaturii de încălzire (*b*) asupra dilatării fontelor feritice la austenitizare [435].

6.1. Recoacerea de grafitizare

Anterior s-a arătat faptul că în stare turnată fontele cu grafit vermicular prezintă o tendință mai scăzută de formare a cementitei libere în raport cu fontele cu grafit nodular [324].

Perfecționarea tehnologiilor de fabricare a pieselor din fontă cu grafit vermicular, în special în ceea ce privește compoziția chimică și tehnica de postmodificare, asigură eliminarea cementitei libere.

În cazul unor piese cu pereți subțiri, mai mulți producători de fontă cu grafit vermicular recomandă totuși aplicarea unui astfel de tratament termic. Astfel, pentru piese cu grosimea de 5...20 mm din fontă cu grafit vermicular, obținută prin modificarea cu ceriu, se recomandă următorul tratament termic: menținere 3 h la 900°C, secire la 550°C (în cuptor), menținere 4 h la

Scanned with OKEN Scanner

550°C și apoi răcire în aer. Acest tratament termic asigură eliminarea cementitei libere și obținerea următoarelor caracteristici mecanice: R_m = 328...377 N/mm², $R_{0,2}$ = 260...305 N/mm², A = = 3,5...7,8%, HB = 136...170 [353].

În altă lucrare [74] se susține necesitatea tratamentului termic de recoacere grafitizantă, aplicat pieselor cu pereți subțiri, după următorul regim: menținere 3...8 h la 900°C, urmată de o răcire cu viteză scăzută pînă la 650°C (în cuptor) și apoi în aer.

Utilizînd mischmetall în vederea obținerii fontelor cu grafit vermicular, se remarcă necesitatea utilizării tratamentului termic de recoacere grafitizantă a pieselor cu grosime de perete sub 20 mm [330].

Aplicînd un tratament termic de recoacere grafitizantă completă, respectiv de eliminare a cementitei libere și legate, se asigură obținerea unei structuri cu 100%F.

Trebuie menționat faptul că în cazul fontelor cu grafit vermicular, cu o mare tendință de formare a feritei la transformarea eutectoidă, aplicarea acestui tratament termic este utilizat într-o mai mică măsură decît la fontele cu grafit nodular.

În cazul unor fonte cu grafit vermicular cu 3,46%C, 2,55%Si 0,04%Mn, 0,02%P, 0,01%S, obținute prin modificarea cu 0,15% Ce-MM și postmodificate cu FeSi75 (0,5%Si) au fost realizate, în stare turnată, caracteristicile prezentate în tabelul 6.2 [130]. În urma unui tratament termic de recoacere de feritizare a fost realizată o creștere a alungirii fontei (tabelul 6.2). Structura ce

Tabelul 6.2

CARACTERISTICI ALE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR ÎN STARE TURNATĂ ȘI DUPĂ FERITIZARE [130]

Parametrul	Stare turnată	După feritizare
Caracteristici mecanice:		
Rm, în N/mm²	378	345
$R_{0,2}$, în N/mm²	272	250
A, în %	5,5	8,0
E, în N/mm²	—	140000
HB	—	140
Forma grafitului,		
% K	5	—
% L	10	10
% M	5	5
% N + P	80	85
Masa metalică de bază, în %		
Ferită	90	100
Perlită	10	—

Scanned with OKEN Scanner

conține grăunți de ferită cu diametrul mediu de 44 μm a fost obținută prin următorul tratament: 3 h menținere la 900°C, răcire timp de 3 h pînă la 700°C, menținere timp de 6 h la 700°C, urmată de o răcire în cuptor.

În urma unui tratament termic de recoacere grafitizantă completă, care a constat din menținere de 3 h la 900°C, răcire timp de 3 h pînă la 700°C, menținere de 6 h la această temperatură și apoi răcire în cuptor, au fost obținute fonte cu grafit vermicular și nodular, cu structură complet feritică, cu caracteristici mecanice deosebite (tabelul 6.3) [256].

Tabelul 6.3

CARACTERISTICILE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR ȘI NODULAR FERITICE [256]

Caracteristica	Tipul fontei	
	Fgv	Fgn
Compoziția chimică, în %:		
C	3,47	3,73
Si	2,45	2,52
Mn	0,03	0,04
P	0,013	0,021
S	0,005	0,002
Mg	—	0,081
Ce-MM	0,09	—
Carbon echivalent, în %	4,29	4,58
Caracteristici mecanice:		
R_m, în N/mm²	330	398
$R_{0,2}$, în N/mm²	237	247
A, în %	6,3	22,9
HB (30/10)	140	150

În cazul în care fontele conțin în compoziția chimică elemente cu acțiune perlitizantă, durata de menținere la transformarea eutectoidă crește în mare măsură. Astfel, în cazul unor fonte aliate cu 1,5%Ni, o feritizare completă a fost obținută printr-o menținere de 12 h la 690°C, după o austenitizare de 2 h la 900°C (piese de 25 mm) [355].

La grosimi de perete de 25 mm, menținerea 3 h la 920°C, răcirea cu viteza de 40°C/h pînă la 700°C urmată de perioade diferite de menținere la această temperatură determină obținerea unor proporții variabile de ferită [154].

Scanned with OKEN Scanner

6.2. Normalizarea

A fost arătat faptul că în cazul fontelor cu grafit vermicular obținerea unor proporții ridicate de perlită în structura în stare turnată constituie o problemă. Alături de aliere, tratamentul termic de normalizare constituie o posibilitate de realizare a unor piese din fontă cu grafit vermicular la care cantitatea de perlită atinge valori ridicate.

În cazul turnării segmenților de piston din fontă cu grafit vermicular, proporții de peste 90%P au fost obținute în urma unei normalizări prin menținere 2 h la 900°C, urmată de o răcire în aer [191].

Rezultate similare au fost obținute și de către alți autori prin încălzire 2 h la 900°C și răcire în aer [355] sau prin încălzire 2 h la 920°C și răcire în aer [154].

7. CONSIDERAȚII ECONOMICE PRIVIND UTILIZAREA FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR LA TURNAREA PIESELOR

Fontele cu grafit vermicular însumează, în mare parte, caracteristicile pozitive care caracterizează fontele cu grafit lamelar și nodular, utilizate în prezent la turnarea pieselor (tabelul 7.1).

Tabelul 7.1

CARACTERISTICILE FONTELOR CU GRAFIT LAMELAR, VERMICULAR ȘI NODULAR

Caracteristica	Tipul fontei			
	Fgl (perlitică) Fc 200... Fc 400	Fgv		Fgn Fgn 370... Fgn 600
		Feritică Fgv 300	Ferito-perlitică Fgv 350— Fgv 400	
1	2	3	4	5
Rezistența la tracțiune, R_m, în N/mm²	200...450	300...350	350...500	370...700
Limită curgere, $R_{0,2}$, în N/mm²	—	220...280	240...340	250...500
Raportul $R_{0,2}/R_m$	—	0,66...0,79	0,7...0,85	0,65...0,75
Alungirea, A, în %	max. 1,0	3...10	1...5	2...20
Duritatea HB	200...280	120...160	160...250	140...300
Raportul R_m/HB	0,8...1,8	2,2...2,5	1,8...2,2	2,7...3,1
Rezilienta, KCU, în daj/cm²	—	max. 2,0	max. 1,0	max. 3,0
Modul de elasticitate E, în kN/mm²	80...155	120...140	140...170	165...185
Rezistența la oboseală, $R_{-1\,t}$, în N/mm²	150...200	180...280	280...400	300...600
Conductibilitatea termică λ_{20}^{100}, în W/m.K	38...50	35...55		25...40
λ_{20}^{400}, în W/m.K	35...42	32...40		22...32
Difuzivitatea termică a, în m²/h	0,043...0,045	0,042...0,043		0,03

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 7.1 (continuare)

1	2	3	4	5
Coeficientul de dilatare liniară α_{20}^{200}, în $\times 10^6$ m/m°C	11...13	12...14		9...13
Rezistivitatea electrică ρ, în $\mu\Omega$ cm	60...80	70...80		40...75
Densitatea, în g/cm³	7...7,7	7,0...7,3		7,1...7,35
Permeabilitate magnetică, μ_{max}, Gs/Oe	250...600	300...1500		300...2000
Fluiditatea, în mm	600...700	700...800		700...780
Contracția liniară, în %	1,1...1,3	1,05...1,2		0,77...1,0
Volumul retasurii, în %	1...3	1...5		4...10
Oxidare (700°C), ΔG, în %	3...4,5	0,8...2,0		0,5...1,0
Rezistență relativă la șoc termic	1,0	1,25...1,6		1,3...1,8
Etanșeitatea (presiune, bar), pe probe 0,8 mm	10...120	200...280		250...350
Pierderi relative la coroziune	1,55	1,12		1,0
Forță de așchiere, daN	30...45	10...20	20...60	20...80
Amortizarea vibrațiilor ($\delta \times 10^{-4}$)	13,2	4...7		2,5

În tabelul 7.2 este prezentat un studiu comparativ al principalelor proprietăți ale fontelor cu grafit vermicular, în raport cu celelalte tipuri de fonte, care poate sta la baza implementării în producția de piese turnate a acestui nou material.

În comparație cu fonta cu grafit lamelar, fontele cu grafit vermicular sînt caracterizate prin proprietăți mecanice la valori mai mari, ceea ce determină posibilitatea reducerii grosimii de perete cu (10...50%) precum și mărirea duratei în exploatare, în special în cazurile în care se impune tenacitate. Pe de altă parte, aceste fonte sînt caracterizate prin proprietăți de exploatare în majoritatea cazurilor la cote înalte, cum ar fi rezistența la oxidare și șoc termic, etanșeitatea, prelucrabilitatea (la o structură feri-

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 7.2

STUDIU COMPARATIV AL FONTELOR CU GRAFIT LAMELAR, VERMICULAR ȘI NODULAR

Superioritate Fgv în raport cu Fgl sau Fgn		Caracteristica	Superioritate Fgl sau Fgn în raport cu Fgv	
Fgv—Fgl	Fgv—Fgn		Fgl—Fgv	Fgn—Fgv
●		Rezistență		○
●		Plasticitate		○
●		Tenacitate		○
●		Modulul de elasticitate		○
●	○	Raportul $R_{0,2}/R_m$		
●		Raportul R_m/HB		○
●		Comportarea la oboseală		○
	○	Efect de crestare la oboseală	●	
●	○	Rezistență la temperaturi ridicate		
	○	Conductibilitate termică	●	
	○	Difuzivitate termică	●	
●		Rezistență la coroziune		○
●		Rezistență la oxidare		○
●	○	Rezistență la șoc termic		○
●		Etanșeitate		○
	○	Amortizarea vibrațiilor	●	
●	○	Prelucrabilitatea		
	○	Volumul retasurii	●	
●	○	Fluiditatea		
	○	Sensibilitatea la formarea defectelor de contracție	●	
●	○	Sensibilitatea la formarea cementitei		
●	○	Realizarea structurii feritice în stare turnată		
●	○	Sensibilitatea la variația grosimii de perete		
		Realizarea structurii perlitice în stare turnată	●	○

● Fgv în raport cu Fgl
○ Fgv în raport cu Fgn

Scanned with OKEN Scanner

tică); proprietățile de turnare sînt bune, comparabile cu cele ale fontelor cenușii din marcile Fc 150 — Fc 200. De asemenea, sensibilitatea la variația grosimii de perete este mai mică. Ca inconveniente față de fontele cu grafit lamelar se pot reține coeficientul de scoatere ceva mai scăzut (cu 1...3%) și în anumite cazuri, sensibilitatea mai mare față de formarea defectelor de contracție.

Principalele domenii, în care fonta cu grafit lamelar este înlocuită cu cea cu grafit vermicular, în condiții economice, sînt: piese pentru construcția de mașini, supuse unor solicitări mecanice mai accentuate; piese la care este necesară asigurarea unei etanșeități ridicate (presiuni de peste 100 bar); piese cu configurație complexă supuse unor încercări la presiune; piese ce lucrează în condiții de oxidare și șoc termic (lingotiere, piese pentru motoare termice, forme metalice). În majoritatea cazurilor este posibilă reproiectarea pieselor, în sensul reducerii grosimii de perete precum și al eliminării elementelor de aliere (în cazul acceptării structurii feritice). Prelucrarea este realizată cu o productivitate mai mare și la un cost mai scăzut, în comparație cu fontele cenușii din mărcile Fc 300...Fc 400.

In raport cu fonta cu grafit nodular, acest material este caracterizat prin proprietăți de rezistență, plasticitate și tenacitate apropiate, excelînd însă prin conductibilitate termică (în special la temperaturi ridicate) și proprietăți de turnare bune, mai ales în cazul unor piese cu configurație complexă, caz în care fontele cu grafit nodular sînt foarte sensibile la apariția defectelor de contracție. Volumul mai mic de retasură asigură un grad mai mare de utilizare a fontei lichide, în unele cazuri renunțîndu-se la maselotare.

Pe de altă parte este posibilă obținerea unor piese, fără cementită și cu structură preponderent feritică, direct din turnare, fără necesitatea utilizării unor materiale metalice cu caracteristici speciale sau apelării la tratamentul termic. La grosimi mari de perete grafitul vermicular este asigurat mai ușor și mai sigur decît cel nodular, în condițiile unei modificări cu un cost mai scăzut.

Fonta cu grafit vermicular este de preferat celei cu grafit nodular, în mai multe cazuri: atunci cînd sînt suficiente caracteristici mecanice în limitele $R_m = 300...600$ N/mm², $A = 1...8\%$, $KCU =$ max. 1,5 daj/cm²; piese mari, cu pereți groși, solicitate la oxidare și șoc termic, cum ar fi lingotierele (peste 5,0 t), caz în care se realizează o reducere importantă a greutății (cu 10... 30%), piese cu configurație complexă, cu variații ale grosimii de perete, ce trebuie să asigure o bună etanșeitate (hidroaparatură).

Trebuie remarcat faptul că atît încărcătura metalică cît și modificarea sînt mai puțin costisitoare în cazul producerii fontei cu grafit vermicular.

Scanned with OKEN Scanner

Se poate aprecia deci că utilizarea fontei cu grafit vermicular poate conduce la obținerea durabilității ridicate în exploatare (în special în cazul lingotierelor, motoarelor termice, hidroaparaturii), la micșorarea rebutului la turnare (în special la controlul la presiune), la reducerea greutății pieselor turnate, deci economie de metal și energie, creșterea puterii motoarelor etc.

În ceea ce privește *obținerea* fontei cu grafit vermicular, se apreciază că în condițiile țării noastre cea mai economică tehnologie se dovedește a fi cea bazată pe magneziu, ca element modificator.

O stabilitate mai mare a procesului de realizare a grafitului vermicular se obține în condițiile utilizării, concomitente, a unor elemente modificatoare (Mg, Ca) și antimodificatoare (Al, Ti).

Prezența ceriului alături de elementele modificatoare amintite întărește procesul de compactizare a grafitului, dar utilizarea acestui element este limitată de considerente economice, fiind scump și în întregime importat. Obținerea, în viitor, a unor pămînturi rare indigene, o să permită includerea lor în compoziția modificatorilor, în vederea producerii unor fonte modificate de bună calitate (inclusiv Fgv).

În prezent, în țara noastră există preocupări în direcția obținerii fontelor cu grafit vermicular bazate pe utilizarea unor prealiaje ce conțin magneziu, ca principal element modificator.

Astfel, în cadrul ICSITPSC-București a fost stabilită o tehnologie bazată pe utilizarea modificatorilor din sistemul FeSiCaTiMgCe, produși în prezent în cadrul microproducției institutului, urmînd să fie realizați de către I.M. Vaslui, acești modificatori conținînd deci și ceriu.

La Institutul Politehnic București au fost realizate tehnologii care prevăd utilizarea modificatorilor din sistemul FeSiCaAlTiMg, tip MODIVER (Simbol MV) produși de către Combinatul Metalurgic Tulcea. Acești modificatori nu conțin ceriu sau alte elemente din grupa pămînturilor rare. Compoziția prealiajelor tip Modiver este caracterizată prin aceea că conținutul de magneziu, raportul între conținuturile elementelor antimodificatoare (Al, Ti) și modificatoare (Ca, Mg) se reglează funcție de conținutul de sulf al fontei, grosimea de perete (mărimea piesei) și durata de menținere după modificare. În condițiile realizării unor cantități mari de perlită modificatorii conțin și elemente cu acțiune perlitizantă. În prezent, în producția de lingotiere se utilizează modificatorul MV41, în timp ce în construcția de mașini MV21 sau MV21 — MC (cu efect perlitizant).

În continuare sînt prezentate unele aspecte economice referitoare la principalele domenii de utilizare a fontei cu grafit vermicular.

Scanned with OKEN Scanner

7.1. Utilizarea fontei cu grafit vermicular la turnarea lingotierelor

A fost arătat că mai mulți producători de lingotiere semnalează faptul că trecerea de la fonta cu grafit lamelar la cea cu grafit vermicular asigură o creștere a durabilității, respectiv o micșorare a consumului de lingotiere pe tona de oțel turnat, cu însemnat efect economic.

Astfel, în Anglia se obțin economii de circa 1,0 milion lire sterline ca urmare a utilizării a 5000 lingotiere (100 000 t fontă), în urma reducerii consumului acestora de la 17,71 la 12,51 kg lingotiere/t oțel [108].

În U.R.S.S., lingotierele din fontă cu grafit vermicular au înregistrat o durabilitate de 1,6 ori mai mare decît cele din fontă cu grafit lamelar, în condițiile în care costul lor a fost doar de 1,15 ori mai mare.

În vederea stabilirii eficienței economice a utilizării lingotierelor din Fgv sînt luate în calcul cele de tip LN80 (9,5 t), la modificare utilizîndu-se prealiajul Modiver (MV41). Modificarea fontei contribuie la creșterea costului de producție cu pînă la 800 lei/t dar asigură o mărire a durabilității ingotierelor cu 60...80% față de cazul turnării din Fgl. În aceste condiții, consumul specific de lingotiere scade cu 6...8 kg/t oțel. Reproiectarea lingotierelor care să conducă la reducerea greutății cu 10...20% contribuie la micșorarea consumului specific cu încă 1...3 kg/t oțel. La o cantitate de 1,0 mil. tone oțel turnat rezultă economii de pese 25,0 mil. lei, ca urmare a reducerii consumului de lingotiere. Luînd în considerare faptul că se economisesc, în acest caz, peste 10 000 t fontă lichidă, rezultă o economie de energie corespunzătoare a peste $2{,}2 \cdot 10^6$ kg combustibil convențional (s-a considerat un consum de 220 kg combustibil convențional/t fontă). La aceasta se adaugă și economisirea a peste 500 t fontă, care ar reprezenta pierderile prin ardere la elaborare.

Eliminarea necesității aplicării tratamentului termic (față de Fgn) contribue, de asemenea, la reducerea costului.

7.2. Utilizarea fontei cu grafit vermicular în construcția de mașini

La calculul eficienței utilizării fontei cu grafit vermicular în construcția de mașini trebuie luate în considerare, în principal, următoarele: posibilitatea reducerii grosimii de perete, mărirea

Scanned with OKEN Scanner

durabilității în exploatare, reducerea rebutului, creșterea performanțelor mașinilor și utilajelor, îmbunătățirea prelucrabilității etc.

Spre exemplificare, se va lua în considerare cazul chiulaselor motoarelor termice turnate în mod uzual din fontă cenușie, cu grafit lamelar, slab aliată cu Cr-Cu (Fc 250 CrCu). Se consideră o reducere a greutății pieselor turnate cu 20% și o micșorare a coeficientului de utilizare a fontei lichide cu 3% la turnarea din fontă cu grafit vermicular (Fgv 300).

Considerînd piese care în cazul turnării din Fc 250 CrCu cîntăreau 100 kg se obține o reducere a costului fontei lichide cu peste 200 lei/buc la turnarea din Fgv, datorită reducerii greutății și eliminării alierii.

La o producție de 1000 t piese bune rezultă economii de peste 2,0 mil. lei, ca și economisirea a peste 140 000 kWh.

Chiar și în cazul în care nu se practică o reducere a grosimii de perete rezultă o serie de avantaje, prin mărirea puterii motorului (min. 20%), îmbunătățirea prelucrabilității și reducerea rebutului de la încercare la presiune.

În cazul utilizării chiulaselor din fontă cu grafit vermicular puterea motoarelor Diesel a fost mărită cu 30% față de cazul utilizării fontelor cu grafit lamelar aliate (Fc 300) [300].

Producerea corpurilor de turbocompresoare de Fgv a condus la economii de 15...20 ruble/t, datorită eliminării elementelor de aliere, fiind înlocuite fontele FcNiMo, chiar în cazul folosirii la modificare a prealiajelor cu ceriu, tip Siitmiș. A scăzut de asemenea rebutul datorită unei compactități mai bune [4].

Firma „General Motors" arată că reducerea grosimii de perete a colectoarelor de gaze, la 2,5 mm, în cazul turnării din Fgv, a condus la economii importante, față de cazul utilizării fontelor cu grafit lamelar [297, 447].

În cazul unor piese pentru automobile și tractoare, firma Steyr-Daimler Puch AG-Austria anunță realizarea unui cost de producție cu 20% mai scăzut decît în cazul fontei maleabile și cu 30% față de fonta cu grafit nodular [353].

Pe ansamblu se poate aprecia că utilizarea fontei cu grafit vermicular în construcția de automobile și tractoare conduce la scăderea greutății acestora, concomitent cu asigurarea unor performanțe superioare în exploatare, în condițiile reducerii costului de fabricație.

În unele cazuri pot fi înlocuite fontele cu grafit nodular, a căror modificare este mai costisitoare și la care necesitatea aplicării tratamentului termic este frecventă.

Scanned with OKEN Scanner

8. FIȘĂ TEHNICĂ PENTRU ELABORAREA FONTEI CU GRAFIT VERMICULAR (COMPACT)

8.1. Generalități

Prezentele instrucțiuni se referă la elaborarea fontei cu grafit vermicular (Fgv) în cuptoare electrice, cu inducție sau cu arc sau în cubilou.

8.2. Caracteristicile fontei

8.2.1. Caracteristici mecanice

În tabelul 8.1. sînt prezentate caracteristicile mecanice ale principalelor clase de fonte cu grafit vermicular, ce pot fi utilizate la turnarea pieselor (probe 25 mm, în stare turnată).

Tabelul 8.1

CARACTERISTICILE MECANICE ALE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR

Clasa fontei	Rezistența la rupere R_m, N/mm²	Limita de curgere R_p 0,2 N/mm²	Alungirea A_5, %	Modulul de elasticitate E, 10^3N/mm²	Rezilienta KCU, j/cm² (probă crestată)	Duritate Brinell HB
	Mnimum					
Fgv 300	300	200	3,0	120...140	5...15	120...160
Fgv 350	350	240	1,5	140...160	—	160...220
Fgv 400	400	280	1,0	160...170	—	200...280

8.2.2. Structura fontelor

În tabelul 8.2. sînt prezentate caracteristicile structurale orientative ale fontelor cu grafit vermicular.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 8.2

CARACTERISTICILE STRUCTURALE ORIENTATIVE ALE FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR

Clasa fontei	Caracteristica masei metalice de bază	Compoziția masei metalice de bază	Cementită	Proporția grafitului		
				Gl	Gv	Gn
Fgv 300	Feritică	Max. 30% P	Max. 2%	—	Min. 80%	Max. 20%
Fgv 350	Ferito-perlitică	30—70 %P	Max. 2%	—	Min. 80%	Max. 20%
Fgv 400	Perlitică	Min. 70% P	Max. 5%	Max. 5%	Min. 80%	Max. 20%

8.2.3. Compoziția chimică

În tabelul 8.3. este prezentată compoziția chimică de bază a fontelor cu grafit vermicular.

Tabelul 8.3

COMPOZIȚIA CHIMICĂ A FONTELOR CU GRAFIT VERMICULAR

Grosimea peretelui piesei, mm	% C	% Si	% P	% S max	% Mn		Grad saturație în carbon	Carbon echivalent *CE*, %
					Fgv 300	Fgv 350 Fgv 400		
≤ 10	3,5—3,9	2,5—3,2	max. 0,08	0,03	max. 0,4	0,6—0,9	1,0—1,15	4,3—4,8
> 10	3,4—3,8	2,0—3,0	max. 0,08	0,03	max. 0,6	0,8—1,2	0,90—1,1	4,0—4,6

Observație. Obținerea structurilor perlito-feritice (peste 50% P) și a celor perlitice (peste 90% P) este realizată prin aliere (0,2—1,5% Cu, 0,2—0,6% V, 0,1—0,3% Sn, 0,1—0,3% Sb, 0,3—1,5% Ni etc.).

8.3. Marcarea șarjelor

Șarjele vor fi marcate cu simbolul clasei de fonte produse, respectiv Fgv 300, Fgv 350 sau Fgv 400.

8.4. Agregatul de elaborare

Elaborarea va avea loc în cuptoare electrice cu inducție, cu creuzet, cu căptușeală acidă sau bazică sau în cuptoare cu arc.

Scanned with OKEN Scanner

Topirea poate fi efectuată și în cubilou, dar în acest caz se recomandă desulfurarea în afara agregatului, pînă la conținuturi sub 0,05% S.

8.5. Materii prime. Elaborare

Materialele metalice utilizate în încărcătura agregatului de elaborare trebuie să asigure obținerea unui conținut final de sulf de max. 0,05%, rezultate mai stabile obținîndu-se la max. 0,03% S; în caz contrar, se impune desulfurarea în oală a fontei.

Modificarea și postmodificarea fontei contribuie cu un aport de 0,5...1,0% Si, ceea ce favorizează utilizarea unor cantități mai-mari de deșeuri proprii în încărcătura (min. 40%). Se mai poi utiliza de asemenea fonte de primă fuziune (FK, FAK, FIP), 10..t 30% și deșeuri de oțel (20...40 %). Pentru corectarea carbonului. se utilizează deșeuri de electrozi, iar pentru desulfurare, carbură de calciu.

Înainte de modificare, fontele vor conține max. 0,05% S și 1,6...2,0% Si. După obținerea compoziției chimice impuse, se realizează o supraîncălzire la 1420...1500°C, durata de menținere la această temperatură fiind de 10...20 min.

8.6. Modificarea fontei

În vederea modificării fontei se utilizează prealiaje complexe din sistemul FeSiCaAlTiMg, tip MODIVER (MV) sau FeSiCaMg-TiCe. În condițiile necesității asigurării unor cantități mai mari de perlită, se pot utiliza modificatori cu efect perlitizant, din clasa MV 21 — MC. Acești modificatori sînt produși de către C.M. Tulcea ICSITPSC și I.M. Vaslui. Consumul de modificator este determinat în principal de către conținutul de sulf al fontei supuse modificării (tabelul 8.4).

Tabelul 8.4

CONSUMUL DE MODIFICATOR ÎN VEDEREA OBȚINERII Fgv

Conținutul de sulf al fontei înainte de modificare, în %	0,01—0,025	0,025—0,04	0,04—0,05
Consum modificator, în %	0,7—0,85	0,85—1,1	1,1—1,3

Înainte de utilizare este necesară o omogenizare (amestecare) a modificatorului, astfel încît să se asigure variații cît mai scăzute ale compoziției chimice.

Scanned with OKEN Scanner

Modificarea se realizează în oală cu „buzunar", prin procedeele Sandwich, Trigger, Tundish-Cover, Tea-Pot etc.

Temperatura de modificare a fontei este de 1380...1430°C, modificatorul avînd o granulație de 5...30 mm.

Postmodificarea fontei se realizează cu 0,3...0,5% FeSi 75, cu granulația de 1,6 mm.

Turnarea fontei are loc de regulă la 1320...1350°C.

Durata de menținere a fontei, de la modificare pînă la turnare, nu trebuie să depășească 10 min (de preferat max. 5 minute).

8.6. Controlul calității fontei

În cursul procesului de elaborare — modificare, temperatura fontei va fi menținută în permanență sub control, impunîndu-se în mod deosebit încadrarea temperaturii de modificare în limitele impuse.

Compoziția chimică va fi verificată după topire și corectare.

Analiza aspectului rupturii probei de nodulizare poate da informații privind gradul de compactizare a grafitului: la o culoare cenușie grafitul este lamelar, în timp ce la o culoare gri-argintie, grafitul este nodular. La culori intermediare, respectiv cenușiu-închis (negru), grafitul este vermicular.

Analiza metalografică va fi efectuată conform STAS 6905-84 pe proba de nodulizare sau direct pe piesă.

În continuare se va prezenta modalitatea de analiză metalografică a fontelor cu grafit vermicular, cu ajutorul STAS 6905-84 (revizie STAS 6905-76).

Conform scării etalon 1 (STAS 9606-84), grafitul vermicular (Gv) corespunde formei Gf 3 (forma III-ISO), în timp ce grafitul lamelar (Gl) este caracterizat prin forma Gf 1 (forma I-ISO) iar cel nodular (Gn) prin formele Gf 5 și Gf 6 (formele V și VI-ISO).

Pentru caracterizarea din punctul de vedere al mărimii și suprafeței ocupate grafitul vermicular se asimilează cu cel lamelar, folosindu-se în acest scop scara etalon 3 (lungime) și 4 (suprafața ocupată).

Lungimea grafitului vermicular va fi cuprinsă în limitele 5... 160 μm (Gl2...Gl5 STAS 6905-84), suprafața ocupată de către

Scanned with OKEN Scanner

acesta în proba metalografică depășind 10% (G 12, G 15 — STAS 6905-84).

Suprafața ocupată de ferită și perlită este determinată cu ajutorul scărilor etalon 12—13/STAS 6905-84, celor trei clase de fonte corespunzîndu-le:

Fgv 300 — F 80/P 20...F 90/P 10;
Fgv 350 — F 60/40...F 40/P 60;
Fgv 400 — F0/P 100...F 20/P 80.

Conținutul de cementită și ledeburită este controlat cu ajutorul scării etalon 16/STAS 6905-84, pentru Fgv 300 — Fgv 350 admițîndu-se max. LC 1, în timp ce pentru Fgv 400 se admite și LC 3.

În vederea stabilirii caracteristicilor mecanice ale fontelor cu grafit vermicular, se vor turna probe tip U, Y, în bloc, sau atașate pieselor. Turnarea probelor și efectuarea încercărilor mecanice, conform condițiilor impuse de către STAS 6071-82.

8.7. Măsuri de protecția muncii

Măsurile de protecția muncii necesare a fi luate în considerare la elaborare sînt cele proprii agregatului de topire utilizat.

În cadrul procesului de modificare, în afara măsurilor generale de protecția muncii vor fi avute în vedere, în mod special și următoarele:

— oala de modificare va fi bine curățită și uscată, fiind încălzită la min. 700°C;

— modificatorul, uscat în prealabil, va fi protejat în „buzunarul" oalei de modificare, astfel încît să fie evitată reacția de la primul contact cu fonta lichidă;

— se va evita turnarea fontei lichide direct pe buzunarul cu modificator, situație ce ar putea conduce la o reacție violentă la modificare;

— în timpul transportului oalei cu fonta modificată, precum și în timpul îndepărtării zgurei, reacția de modificare poate reîncepe, datorită eliberării unor bucăți de modificator, blocate pînă în acest moment în zgură (sau buzunar);

— la postmodificare, va fi utilizat FeSi 75 (sau alt modificator grafitizant) usacat, fără impurități, adăugarea acestuia

Scanned with OKEN Scanner

în fonta lichidă fiind efectuată uniform, fără provocarea de stropi.

Conținutul scăzut de magneziu al modificatorului (sub 6%) precum și cantitatea scăzută de prealiaj utilizat la modificare (de regulă sub 1,5%) asigură condiții de tratare a fontei lichide (de muncă) mai bune decît la producerea fontei cu grafit nodular. Este necesar totuși ca procesul de modificare să fie realizat de un personal bine instruit și echipat.

Observație: Instrucțiunile de protecția muncii prezentate nu exclud ci numai completează instrucțiunile și normele generale de protecția muncii pentru turnătoriile de fontă.

Scanned with OKEN Scanner

Bibliografie

1. Aleksandrov, N.N. ș.a. Kristallizația i stroenie vermikuliarnovo grafite v ciugune. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 9, 1975, p. 5—6.
2. Aleksandrov, N.N. ș.a. Technologhia polucenia i svoistva vîsokoprocinovo ciuguna s vermikuliarnîm grafitom. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 8, 1976, p. 12—14.
3. Aleksandrov, N.N. ș.a. Patent URSS, nr. 505 735, înr. 12.09.74, Nr. 2 059 281, publ. 8.10.76.
4. Aleksandrov, N.N., ș.a. Primenenie vîsokoprocinovo ciuguna s vermikuliarnîm grafitom dlia detalei dizelnîh dvigatelei. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 7, 1977, p. 9—10.
5. Aleksandrov, N.N., Milman, B.S. Determinarea formei grafitului. Budapesta, Al 45-lea Congres Internațional de Turnătorie, 1978.
6. Aleksandrov, N.N. ș.a. Modifițirovanie ciuguna kompleksnîm ligaturami s RZM i ittriem. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 7, 1975, p. 3—5.
7. Aleksandrov, N.N. ș.a. Sovmestnoe vlianie Mg, Ba i RZM na structuru i svoistva ciuguna. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 1, 1977, p. 4—5.
8. Aleksandrov, N.N. Otlivki iz ciuguna i osnovnîe puti ulucișenia ih kacestva. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 11, 1977, pg. 20—23.
9. Aleksandrov, N.N., Milman, B.S. Soverșenstvovanie modificatorov i svoistv vîsokoprocinovo ciuguna s șarovidnîm grafitom. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 1, 1980, p. 12—13.
10. Aleksandrov, N.N. ș.a. Povîșenie hladkosti vîsokoprocinovo ciuguna. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 1, 1981, p. 4—5.
11. Andreev, V.V. ș.a. Zavarka defektov otlivok iz vîsokoprocinovo ciuguna s vermikuliarnîm grafitom. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 5, 1981, p. 23.
12. Andreev, V.V. ș.a. Issledovanie osobennosti obrazovania vermikuliarnogo grafita v ciugune. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 5, 1981, p. 5—6.
13. Angus, H.T. Physical and Engineering properties of Cast Iron. Birmingam, BCIRA, 1960, 528 p.
14. Anikin, A.A., Samoilov, A.A. Vlianie vtoricinovo modifițirovania ferosilitiem na svoistva ittrievogo ciuguna. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 6, 1978, p. 11—12.
15. Anikin, A.A. Ittrievîi ciugun. Moscova, Mașinostroenie, 1976.
16. Anikin, A.A. ș.a. Osobennosti liteinîh svoistv ittrievogo ciuguna. În: Liteinoe proizvodstvo, nr. 4, 1981, p. 6.

Scanned with OKEN Scanner

163. Klocinev, N.I., Tonkohojenko, V.I. Factorî plotnosti jidkcovo magnievo ciuguna. În: Liteinoe Proizvodstvo, nr. 10, 1981, p. 3—4.
164. Klocinev, N.I. Liteinîe svoistva ciuguna so sferoidalnîm grafitom. Moscova, Maşghiz, 1953.
165. Kostiucenko, V.A. ş.a. Obrazovanie pîlegazovîdelenii pri modifitirovanii ciuguna. În: Liteinoe Proizvodstvo, nr. 2, 1979, p. 26—27.
166. Konishi, M. ş.a. Effect of graphite structure on hardness of cast iron at high temperature. În: Bull. Hiroshima Institute Technol., nr. 15, 1981, p. 91—107.
167. Kosnikov, G.A. ş.a. Vlianie Y i Ce soderjaşcih modifikatorov na struktury i svoistva ciuguna. În: Liteinoe Proizvodstvo, nr. 2, 1982, p. 20.
168. Köhnert, H.J. Kolbenwerkstoffe und ihre Entwicklungstendenzen, (Darin perlitisches Gusseisen mit Vermiculargraphit). Mahle Kolloquium 24/25.5.1973, Stuttgart-Bad Connstatt, p. 20—31.
169. Konecny, L., Skosovsky, P. Ockovanie sivej liatiny komplexom lantanidov a yttria. În: Slevarenstvi, nr. 5, 1980, p. 187—189.
170. Kiquchi, S., Fujii, A., Properties of C/V Graphite Cast Iron, J.F.A.
171. Kleţkin, J.G. Vagranocinaia plavka ciuguna v liteinîh ţehah za rubejom. În: Liteinoe Proizvodstvo, nr. 12, 1981, p. 5—7.
172. Krivoşeev, I. ş.a. Corrosion resistance of cast iron with and without additive treatment. În: Russian Casting Product, nr. 2, 1973, p. 86—87.
173. Kurganov, V.A. ş.a. Prolucenie vîsokoprocinovo ciuguna dlia otlivki izlojniţ. În: Liteinoe Proizvodstvo, nr. 2, 1977, p. 8—10.
174. Kurganov, V.A. ş.a. Primenenie Kompleksnîm modifikatorov pri proizvodstve izlojniţ iz vîsokoprocinovo ciuguna. În: Liteinoe Proizvodstvo, nr. 1, 1981, p. 8—10.
175. Kim, V.S. ş.a. Primenenie karbida kremnia pri plavke ciuguna. În: Liteinoe Proizvodstvo, nr. 2, 1978, p. 9—10.
176. Krause, U., Immekus, K. L'evolution de la fusion de fonte. Cubilot a vent chaud În: Hommes et Fonderie, nr. 79, 1977, p. 24—32.
177. Karsay, S.I., Schelleng, R.D. În: AFS Transactions, vol. 69, 1961, p. 725—730.
178. Karsay, SI, Campomanes, F. Control of graphite structure in Heavy Ductile Iron Castings. În: AFS Transactions, vol. 78, 1970, p. 85—92.
179. Karsay, S.I. Ductile Iron Production Practices. Des Plaines, (Illinois — S.U.A.), 1975.
180. Kust, R.R., Loper, C.R. În: AFS Transactions, vol. 76, 1968, p. 540—546.
181. Kalev, L. ş.a. Demodifiţirovanie na sferografiten ciugun. În: Materialozanie i tehnologhia, nr. 4, 1977, p. 9—31.
182. Kuznetov, B.L. Tehnologhia polucenia Al — ciuguna s şarovidnîm i vermiculiarnîm grafitom. În: Liteinoe Proizvodstvo, nr. 6, 1978, p. 6—7.
183. Kamoda Jeichi — Fonte cu grafit vermicular. În: Imono, 21, nr. 1, 1980, p. 15—20.

Scanned with OKEN Scanner

Nakamura, K. Theory of compacted graphite iron, p. 51—68. Shimojima, S. Production of compacted graphite iron, p. 85—100. Hamoda, K. Production of compacted graphite iron, p. 69—84.

456. * * * Preprint of the 94 th, Grand Lecture Meeting of the Japan Foundryman's Soc., 1978.
Tsunekawa, Y., Shinozawa, T. Evolution of graphite form and tensile properties in vermicular graphite cast iron, p. 60.
Tsuda, N., Kobayashi, T., Setogawa, K., Miyachi, Y. Some experiments on manufacture of vermicular graphite cast iron, p. 63.

457. * * * Preprint of the 95 th Grand Lecture Meeting of the Japan Foundrymen's Soc. ,May 29/30, 1979. Tsuda, M. ș.a. On interface structure of spheroidal graphite cast iron in various molds, p. 39. Nakata, H. ș.a. The thermal fatique properties of vermicular cast iron, p. 65. Miyachi, Y., Tsuda, M. On graphite structure in vermicular cast iron, p. 66. Setogawa, K., Tsuda, M. Some properties at high temperature of vermicular cast iron produced by addition of Aluminium and Magnesium, p. 67.

458. Bremanger Smelterverek, British Patent No. 1.268.706, Bundesrep. Deutschland Pat. Nr. 1.911.024, French. Pat. Nr. 2.007.780, Japan Pat. Nr. 692.102, Swiss Pat., Nr. 529.906.

459.* * * În: Cast, Forg. and Heat. Treat., nr. 10, 1981, p. 40.

460. Standard specification for Compacted Graphite Iron Castings (ASTM proposal, 1982).

461. Marinari, C., Ghisa on graphite vermiculaire. În: Fonderia Italiana, nr. 1, 1981, p. 9—18.

462. Yanagisawa, O. Truan Sheng Lui — Propagation of thermal fatigue cracks, in feritic nodular an,Compacted/vermicular graphite Cast Irons. În: Imono, ianuarie, 1982, p. 38—43.

463. * * * Presentations of Meeting CIATF, Commision 76 on compacted/vermicular graphite cast Irons, April 13, 1982, Chicago, SUA.
a) Chen Yiudi, Yang Jieping, Li He (R.P. Chineză). The production and Properties of CG Cast Iron Treated by RE-Mg-Ti.
b) Kwang Chi Shu, En Shi (R.P. Chineză) — The Morphology of Graphite in vermicular Graphite Cast Iron.
c) Fugiel, T.F. (Foote Mineral Company, S.U.A.) — Parts in production in the United States.
d) Altstetter, J.D., Nowicki, RM (Ford Motor Company, S.U.A.) — C.G. Iron: Its properties and automotive applications.
e) Kusakawa, T. (Heed of C/V Graphite Cast Iron in Japan Commission, Japan Foundry's Society) — The present state of C/V graphite Cast Iron in Japan.

Scanned with OKEN Scanner

Control științific : dr. ing. **Constantin Cosneanu**
Redactor : ing. **Paul Iordănescu**
Tehnoredactor : **Victor Mașek**
Coperta : **Simona Dumitrescu**

Bun de tipar 6.III.1984. Coli de tipar 21
C.Z. 669.136.9

Tiparul executat sub comanda nr. 78
la I.P. „Filaret", str. Fabrica de chibrituri
nr. 9-11, Bucuresti
Republica Socialistă România

Scanned with OKEN Scanner